

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI
“FEDERICO II”
SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

XXVIII Ciclo
Dottorato di Ricerca in

Tecnologie e Sistemi di Produzione

Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della
Produzione Industriale

Tesi di Dottorato di Ricerca



**Studio ed analisi in ambiente FE del comportamento
micromeccanico a compressione di schiume metalliche in lega di
alluminio**

Tutors:

Ch.mo Prof. Ing. **Giancarlo Caprino**

Ch.mo Prof. Ing. **Fabrizio Memola Capece Minutolo**

Coordinatore:

Ch.mo Prof. Ing. **Luigi Carrino**

Candidato:

**Antonio
Caraviello**

Anno Accademico 2015 / 2016

A Rosa, che mi completa nelle scelte.

“Vola solo chi osa farlo”

Luis Sepúlveda



Il dottorato di ricerca, a mio parere, non rappresenta un punto di arrivo o di scoperta ma si configura come un punto di inizio, dal quale spero nascano sviluppi scientifici ed industriali rilevanti. Con il supporto del *Prof. Giancarlo Caprino* e del *Prof. Fabrizio Capece*, i tutor che hanno curato il mio percorso di dottorato, ho avuto modo di apprendere l'approccio accademico su una tematica, l'orientamento al metodo e la modalità di stesura di un articolo scientifico. Ringrazio loro per quello che mi hanno donato. Il percorso svolto rappresenta però, una miniera d'oro non solo per la mia sete di conoscenza, ma anche per la mia psiche. Ho avuto la fortuna di conoscere tante cose, tante persone e tanti approcci, ho analizzato diversi *modus operandi* ed ho capito come vorrei essere e come non vorrei mai diventare. Tra tutte le scoperte, posso dire a gran voce che ho imparato a conoscere me stesso. Ho scelto di intraprendere questo percorso formativo per dare vita ad uno spin-off aziendale non partecipato dell'Ateneo Napoletano che, allo stato attuale, ha contrattualizzato, a tempo indeterminato 10 collaboratori...non penso sicuramente di essere un comune dottorando di ricerca (almeno secondo le statistiche nazionali). In tal senso il profondo ringraziamento va a Sòphia, l'Azienda di cui parlo e rappresento come CEO. In prima istanza, alle persone che insieme a me hanno reso possibile questa follia: sto parlando di *Raffaele Sansone*, *Pierluigi Cirillo* e *Rocco Di Palma*. Nonostante siamo molto diversi abbiamo in comune, oltre ad una cravatta rossa, il valore dell'avanguardia che trasferiamo continuamente ai nostri collaboratori. Loro rappresentano, un valido punto di riferimento, con il quale mi va di rischiare...e sono convinto che pensano di me la stessa cosa.

Sòphia nasce il 10 luglio del 2013 dalla contaminazione filosofica, relativa all'amore per il sapere che popola l'Azienda, con la competenza ingegneristica



dei dottorandi di ricerca che l'hanno fondata. Ovviamente è stato necessario avere un'adeguata pianificazione operativa relativa all'idea di business ed una marcata dose di rischio. L'intero lavoro di ricerca che ho condotto, data la sua complessità, è stato supportato continuamente da alcuni dei collaboratori di Sòphia, tra cui Francesco (mio fratello), il quale ha modellato e trattato le superfici CAD per ottenere il modello RVE su cui realizzare l'analisi FEM. Lo ringrazio vivamente per questo, altrimenti staremmo parando d'altro. Il risultato di questo manoscritto è figlio, oltre che al percorso tecnico citato, anche ad una tenacia e determinazione caratteriale. Ringrazio quindi i diversi anni svolti da cameriere all'età di 15 anni, così come quelli trascorsi a fare il muratore o ad impartire ripetizioni scientifiche. Inoltre, non ultimo, il merito va anche all'esperienza di venditore porta a porta il quale mi ha insegnato sia a metabolizzare il rifiuto da parte di un essere umano che a creare una valida squadra di collaboratori. Infine, mi ha insegnato a non arrendermi mai. Tutte queste esperienze hanno ragione di esistere poiché esistono i miei genitori, i quali essendo i primi consiglieri delle mie scelte, mi trasferiscono valori che difficilmente riscontro in altre persone. Mia Madre (*Anna Agnello*) e mio Padre (*Mattia*) sono l'impersonificazione dell'insegnamento e non mi hanno mai dato un testo su cui studiare, rappresentano il sacrificio e non mi hanno fatto mai mancare nulla, rappresentano la gestione del rischio e non sono imprenditori, rappresentano la mia paura di morire trasferendomi continuamente la voglia di vivere. Questa insaziabile voglia di nuovo, che mia Madre mi contagia giorno dopo giorno, unita ad un approccio positivo verso il sacrificio, dato da mio Padre, mi ha spinto a STRACCIARE un contratto a tempo indeterminato in Germania, paese in cui ho lavorato circa 2 anni, per seguire le orme dell'incerto: il dottorato e quindi la creazione di Sòphia. Non è stato facile, ma d'altronde aiutatemi a ricordare grandi gesta senza forti scelte. Adesso tocca a tutti gli



amici della “soffitta” del DICMAPI, con i quali, nella fase iniziale del PhD, ho condiviso molto. Se dovessi identificare la cosa più bella della soffitta, direi “la leggerezza”, con l’accezione più positiva che conosco. Chi mi conosce sa quanto tengo a questo principio, indice della serietà di una persona e non seriosità....come mi mancano quei pranzi!!, come mi manca quando *Antonio Formisano* introduceva quei discorsi divertenti. Talaltro è stato proprio Antonio che, con enorme pazienza, nella fase iniziale del dottorato, mi ha insegnato come si redige un articolo scientifico. Lo ringrazio tantissimo per questo, così come ringrazio gli altri “soffittari”. Riconosco che ultimamente, per i numerosi impegni lavorativi, non sono stato molto presente nelle loro vite, ma quando avevo modo di incontrarli, mi trasferivano con un sorriso l’allegria e la spensieratezza: questa è l’immagine che ricorderò dell’Università. Una delle fasi più interessante del percorso di dottorato è quando ci si allontanava dall’ingegneria e ci si avvicinava all’irrazionale, ringrazio per questo gli amici del sabato: *Giulia Simeone, Michele Madonna, Antonio Scala, Giulia Pagano, Pasquale Bombara, Claudia Matrone, Fabio Saporito, Angela Bruno, Luigi Corcione e Francesca*. La cosa che mi piace è la sincerità dei loro sguardi nel vedermi sulla strada della realizzazione personale e professionale e poi tutte le risate fatte al bar. Non ricordo alcun week end senza ridere, quindi ho maturato che sarà la cosa più bella che, un domani, insegnerò a mio figlio: ridere di gioia. Adesso, è possibile che vi starete domandando chi sia *Rosa*, la persona che compare nella dedica della prima pagina del manoscritto, alla quale ho dedicato l’intero percorso di dottorato. È davvero una donna speciale, principalmente poiché mi sopporta, prima come imprenditore e poi come ingegnere. Avermi vicino non è semplice, come traspare da queste poche righe scritte, ma vedo nei suoi occhi lo sguardo di chi condivide le scelte, spesso si affida completamente a me. Mi piace poiché è intelligente, quindi ho piacere nel



parlare con Lei, poiché è bella ed ho piacere nel guardarla e vivere insieme i momenti cardini della vita. Mi piace quando ride poiché è contagiosa. Mi piace poiché è sempre timorosa e mi dà continuamente un buon motivo per proteggerla. Mi piace perché un giorno, nella casa che abbiamo acquistato insieme, mi ha risposto sì.



Indice

Capitolo 1 - I solidi cellulari: le schiume metalliche	11
1.1 Strutture cellulari.....	11
1.2 Le schiume metalliche	14
1.3 Tecniche produttive delle schiume metalliche	18
1.3.1 Realizzazione delle schiume di alluminio.....	20
1.4 Formatura da liquido	21
1.4.1 Iniezione del gas: il metodo Cymat/Alcan e Norsk Hydro.....	21
1.4.2 Generazione del gas direttamente nel metallo fuso	24
1.5 Formatura da polveri	29
1.5.1 Il processo produttivo PCM (Powder Compact Melting)	29
Capitolo 2 - Realizzazione della schiuma di alluminio a celle chiuse mediante PCM	32
2.1 Realizzazione della schiuma di alluminio	32
2.2 Equipaggiamento utilizzato per realizzare prove di schiumatura	41
2.2.1 Stampo	41
2.2.2 Forno	43
2.2.3 Termometro	45
2.3 Set up del processo produttivo.....	46
2.3.1 Caratterizzazione termica dello stampo in funzione del tempo	47
2.3.2 Prove di schiumatura.....	55
2.4 Ripetibilità delle prove di schiumatura e ottimizzazione dei parametri	69
Capitolo 3 - La Caratterizzazione meccanica.....	71
3.1 Introduzione	71



3.2	Materiali e metodi	71
3.3	Analisi dei risultati	74
Capitolo 4 - Costruzione del modello geometrico RVE (Representative Volume Element)		
	80
4.1	Analisi della morfologia della schiuma di alluminio a celle chiuse	80
4.2	Creazione del modello geometrico.....	83
4.2.1	Generazione di un RVE (Representative Volume Element) con Digimat	83
4.2.2	Modifiche del modello geometrico con Catia V5.	94
Capitolo 5 - Realizzazione del modello FE.....		99
5.1	Introduzione	99
5.2	Descrizione del file di input di LS-DYNA.....	102
5.3	Descrizione del moto e soluzione delle equazioni di equilibrio	104
5.3.1	Approccio lagrangiano ed euleriano al problema del moto di un corpo	104
5.3.2	Soluzione delle equazioni di equilibrio	110
5.4	Algoritmi di contatto.....	118
5.4.1	Metodo dei vincoli cinematici	119
5.4.2	Penalty Method	120
5.4.3	Distributed Parameters Method.....	121
5.5	Libreria di elementi.....	124
5.6	Riduzione del tempo di calcolo	129
5.7	Modellazione FE della prova meccanica	130
5.7.1	Meshing.....	131
5.7.2	Modellazione delle parti.....	134
5.7.3	Il materiale.....	135
5.7.4	Condizioni al contorno.....	137
5.7.5	Creazione degli algoritmi di contatto	138
Capitolo 6 - Analisi dei risultati e confronto numerico-sperimentale.....		140
6.1	Analisi dei risultati e fase di postprocessing	140
Capitolo 7 - Conclusioni e sviluppi futuri		149
Bibliografia e Sitografia		152



Prefazione

Le strutture cellulari sono largamente presenti in natura: ossa, legno e foglie ne rappresentano solo una parte. Queste strutture combinano una relativamente alta rigidezza e resistenza con una bassa densità, e sono generalmente utilizzate in situazioni nelle quali occorre minimizzare il peso della struttura. In tal senso, le schiume metalliche di alluminio sono prodotte con l'intento di realizzare strutture dotate di elevata resistenza al danneggiamento o alle forze impulsive, visto che la loro struttura composta da una relativamente alta presenza di vuoti omogeneamente distribuita permette di assorbire larghe deformazioni sia in trazione che in compressione. Nel presente percorso di dottorato di ricerca è stata condotta la caratterizzazione micromeccanica di una schiuma metallica, al fine di creare un modello equivalente in ambiente FE. Il modello geometrico della schiuma di Alluminio a cella chiusa, generato mediante l'utilizzo del software DIGIMAT, è stato opportunamente modellato mediante il software CAD parametrico-variazionale CATIA V5 R21. A valle della modellazione geometrica, al fine di eseguirne una prova meccanica di compressione virtuale, è stata eseguita la modellazione FE con l'ausilio del software LS-prepost. Il modello numerico è stato simulato con LS-DYNA. L'analisi è capace di predire il comportamento a compressione di una prova quasi-statica (velocità di avanzamento pari a 0.067 mm/s). Per ricavare i parametri necessari alla caratterizzazione è stato condotto uno studio morfologico di una schiuma di



Alluminio, avente differenti frazioni volumetriche di aria (0,77 – 0,81 – 0,86 – 0,88), prodotta in laboratorio con un precursore fornito dalla Alulight. Il precursore, costituito da una lega di Alluminio (AlSi10) con lo 0.8% in peso di TiH_2 (agente schiumante), è stato ottenuto mediante tecnica PCM (Powder Compact Melting). È stato necessario quindi studiare i parametri caratteristici di una singola cella. Mediante tale analisi stocastica sono stati individuati, come valori discriminanti nel software DIGIMAT, le seguenti variabili: *densità relativa* - ρ^* , *diametro massimo delle porosità* - d_{max} , *frazione volumetrica di aria* (V_f). Sono state generate, mediante i software utilizzati, delle inclusioni per realizzare un modello equivalente (membranale) delle porosità presenti all'interno del provino. Poiché il processo di creazione della geometria risulta fortemente dipendente dalla metodologia random del software DIGIMAT, è risultato necessario creare differenti modelli CAD aventi la stessa percentuale volumetrica.

Al fine di validare il modello numerico, è stato quindi effettuato un confronto statistico, numerico-sperimentale dei risultati ottenuti. In particolare è stata analizzata la curva di carico (σ - ϵ) con le relative grandezze tensili discriminanti.



Capitolo 1 I solidi cellulari: le schiume metalliche

1.1 Strutture cellulari

I materiali cellulari [1] sono generalmente definiti come materiali bifasici, in cui una fase solida coesiste con una fase gassosa. In particolare, il termine “cellulare” indica aggregati di celle adiacenti, che hanno spigoli e eventualmente facce in comune, assemblate in maniera tale da riempire uno spazio tridimensionale, mentre con “schiume” si intende un materiale cellulare nel quale le singole inclusioni di gas risultano interamente racchiuse dal materiale liquido e non risultano interconnesse. Il termine schiuma, che nel suo senso originario si riferisce solamente alla dispersione di gas in un liquido, Figura 1.1, viene impropriamente utilizzato anche nella definizione delle “schiume solide” che rappresentano una classe di materiali cellulari che mantengono la morfologia della schiuma anche nella fase solida [2].

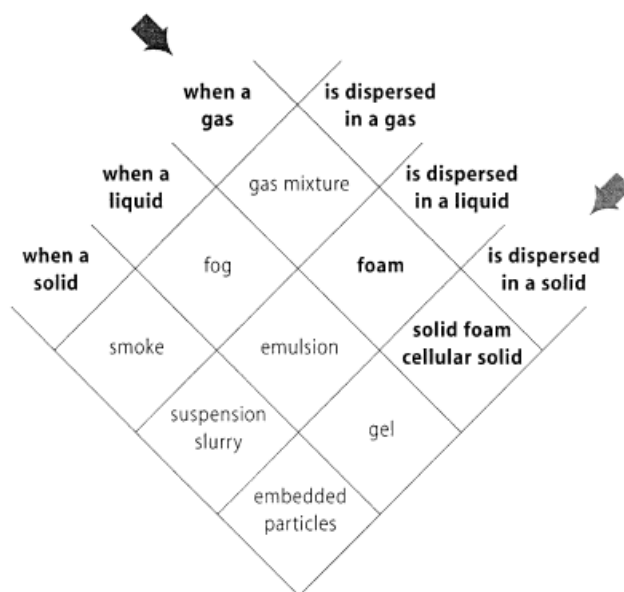


Figura 1.1 - Dispersione di una fase in un'altra fase [2]

Le strutture cellulari sono largamente diffuse in natura [3-5], osso, legno, foglie, corallo ne sono un esempio.

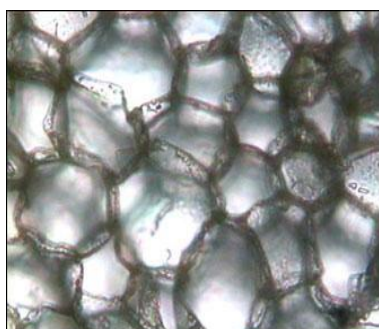


Figura 1.2 - Sughero



Figura 1.3 - Legno

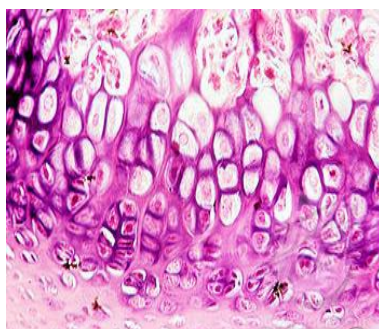


Figura 1.4 - Osso

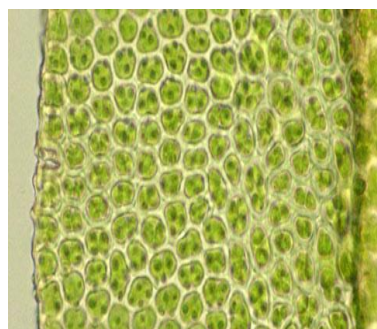


Figura 1.5 - Foglia



In generale, dall'osservazione della natura, è possibile evincere che l'evoluzione ha dato origine a strutture cellulari che ottimizzano le caratteristiche meccaniche e le funzioni strutturali, minimizzando il peso. L'accoppiamento di una fase solida ad una fase gassosa dà origine a strutture con elevate prestazioni specifiche in termini di rapporto tra proprietà e peso. La struttura cellulare conferisce proprietà funzionali uniche quali isolamento termico, assorbimento acustico, galleggiamento. Dal punto di vista strutturale queste strutture combinano una rigidità e una resistenza relativamente alta con una bassa densità, e generalmente sono impiegate in situazioni dove è richiesta una minimizzazione del peso. La dimensione e la forma delle celle, spesso, variano nelle diverse parti della medesima struttura a seconda delle esigenze con l'obiettivo di ottimizzarne l'efficienza. Le strutture cellulari inoltre aumentano la resistenza nei confronti di eventuali danneggiamenti o urti subiti dalla struttura, in quanto, grazie alla loro struttura aperta, riescono ad assorbire grandi deformazioni in trazione o compressione. Nella storia, l'uomo si è servito da secoli dei materiali cellulari naturali per le più svariate applicazioni. Non sorprende quindi il fatto che le proprietà delle strutture cellulari siano state emulate dagli ingegneri nella progettazione dei loro manufatti. Fra i materiali cellulari costruiti dall'uomo, le schiume polimeriche sono attualmente le più importanti in quanto utilizzate in quasi tutti gli ambiti industriali. Esse sono ampiamente utilizzate come riempimenti protettivi nel packaging, e come materiali altamente resistenti agli urti in applicazioni quali i caschi, principalmente per sfruttare la loro caratteristica di subire grandi deformazioni in compressione e, di conseguenza, di assorbire elevate quantità di energia a un livello di tensione relativamente basso. Inoltre vengono utilizzate come materiali strutturali leggeri, per esempio come materiali di riempimento in pannelli sandwich, grazie alla loro alta rigidità e resistenza specifica rispetto a

carichi flessionali. Meno conosciute, ma non di meno interesse da un punto di vista ingegneristico, sono le schiume metalliche. Esse possono presentarsi sia nella forma a celle aperte che chiuse e, come vedremo nel proseguo, è la morfologia che ne distingue i vari campi di applicazione.

1.2 Le schiume metalliche

Le prime ricerche sulle schiume metalliche risalgono agli anni 40 del secolo scorso. Nel 1943 B. Sosnick brevettò un metodo di produzione basato sulla vaporizzazione di costituenti bassofondenti di leghe metalliche: per creare le porosità veniva aggiunto del mercurio all'alluminio fuso [6]. In Figura 1.6 è illustrato schematicamente il metodo adottato. Nei decenni che seguirono questa prima esperienza furono presentate diverse pubblicazioni, brevetti e progetti di ricerca [8-14] per la produzione di schiume metalliche: i metodi utilizzati spaziavano dall'iniezione di metallo fuso dentro interstizi intorno particelle di riempitivo, che in seguito venivano rimosse meccanicamente, fino alla dispersione nel metallo fuso di particelle in grado di rilasciare gas a seguito della decomposizione termica.

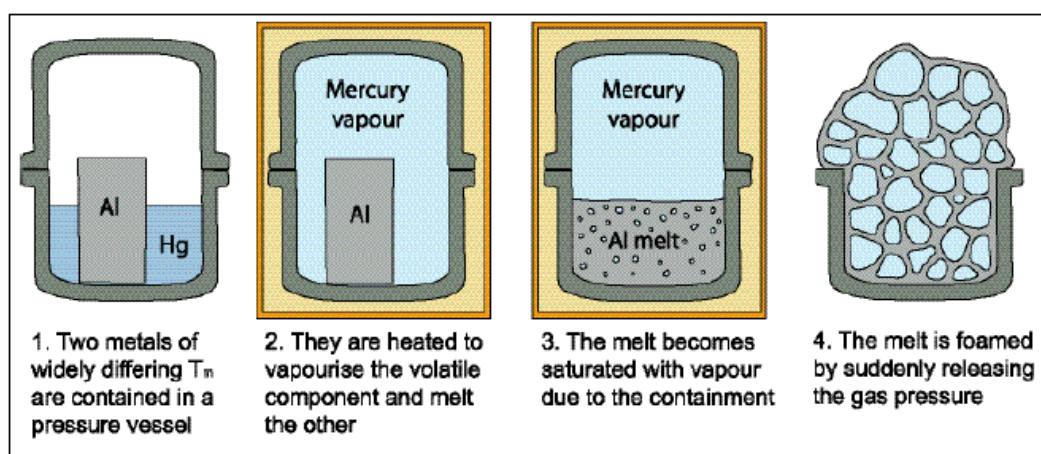


Figura 1.6 - Produzione della schiuma metallica secondo il metodo brevettato da Sosnik [6 -7].

Nei decenni che seguirono questa prima esperienza furono presentate diverse pubblicazioni, brevetti e progetti di ricerca [8-14] per la produzione di schiume metalliche: i metodi utilizzati spaziavano dall'iniezione di metallo fuso dentro interstizi intorno particelle di riempitivo, che in seguito venivano rimosse meccanicamente, fino alla dispersione nel metallo fuso di particelle in grado di rilasciare gas a seguito della decomposizione termica. Nel 1959 B. C. Allen inventò la *"PCF route"* (*Powder Compact Foaming*) per la produzione di manufatti in schiuma metallica partendo non da un bagno fuso, ma da materiale denso solido. Comunque, in generale, la ricerca sulla produzione e sulla caratterizzazione delle schiume metalliche rimase ad un livello accademico fino agli anni 80, quando si assistette ad un nuovo impulso a seguito di nuove attenzioni dal mondo industriale grazie soprattutto alle esperienze svolte al *Fraunhofer Institute for Advanced Materials* di Brema, in Germania. Nuove tecniche produttive e miglioramenti di quelle già consolidate permisero di ridurre i costi di produzione rendendo così le schiume metalliche materiali attrattivi per l'industria dei trasporti, specialmente per la realizzazione di strutture leggere e rigide e per elementi in grado di assorbire gli urti. A seguito di questo rinnovato interesse nacquero negli anni 90 le prime aziende di produzione delle schiume metalliche (Shinko-Wire, Cymat, Alulight, Schunk, Karman, Neuman-Alufoam, etc.) [15 – 17].

Per capire le motivazioni che hanno indotto aziende private e centri di ricerca pubblici e/o privati ad investire ingenti risorse per lo sviluppo di questi materiali occorre passare brevemente in rassegna quelle che sono le loro caratteristiche funzionali e strutturali [2, 18, 19]. Le schiume metalliche, a differenza di quelle polimeriche, permettono un incremento di rigidità, della temperatura di utilizzo e una resistenza ai solventi organici, mentre, rispetto alle schiume ceramiche si ottengono vantaggi in termini di resistenza, di

conducibilità sia elettrica che termica e nella formabilità. Grazie ai loro pori, i metalli cellulari possiedono un insieme di proprietà differenti rispetto al materiale base di cui sono composte: possono essere schiacciate, presentano un plateau di tensione se compresse e un cambiamento di coefficiente di Poisson durante la deformazione, Figura 1.7.

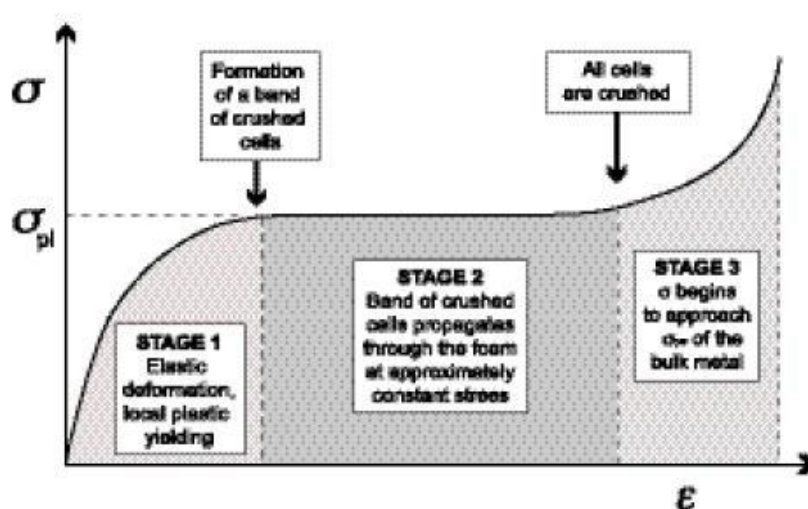


Figura 1.7 - Definizione dei vari fenomeni osservabili nel diagramma tensione-deformazione per una schiuma metallica soggetta ad un'elevata deformazione di compressione [5].

L'eccellente combinazione di buone caratteristiche meccaniche, solitamente resistenza e rigidità, e basso peso sono i vantaggi principali. In aggiunta, i metalli cellulari sono in grado di assorbire alte energie di impatto con qualsiasi direzione di applicazione, sono molto efficienti nell'isolamento acustico, come scudi elettromagnetici e come assorbitori di vibrazioni. Occorre sottolineare che la maggior parte delle proprietà meccaniche delle schiume metalliche possono essere ottenute utilizzando altri materiali, alle volte in modo anche più efficace, ma, al contrario, le schiume possono offrire una combinazione unica di diverse proprietà impossibili da ottenere utilizzando un unico materiale convenzionale. I metalli cellulari quindi sono promettenti in applicazioni per le quali si rendono necessarie diverse di queste funzioni. In

Figura 1.8 è presente un esempio di applicazione multifunzionale: in questo caso se si considera una caratteristica singola, allora le schiume metalliche sicuramente non sono competitive rispetto ad altri materiali di uso comune; se già si considera la contemporanea presenza di due delle caratteristiche considerate allora l'applicazione delle schiume potrebbe risultare vantaggioso; nel caso, infine, che si cerchi un materiale in grado di soddisfare tutte e tre le richieste, allora la scelta delle schiume è assolutamente vincente, anche perché è praticamente impossibile trovare un altro materiale che le presenti tutte contemporaneamente.

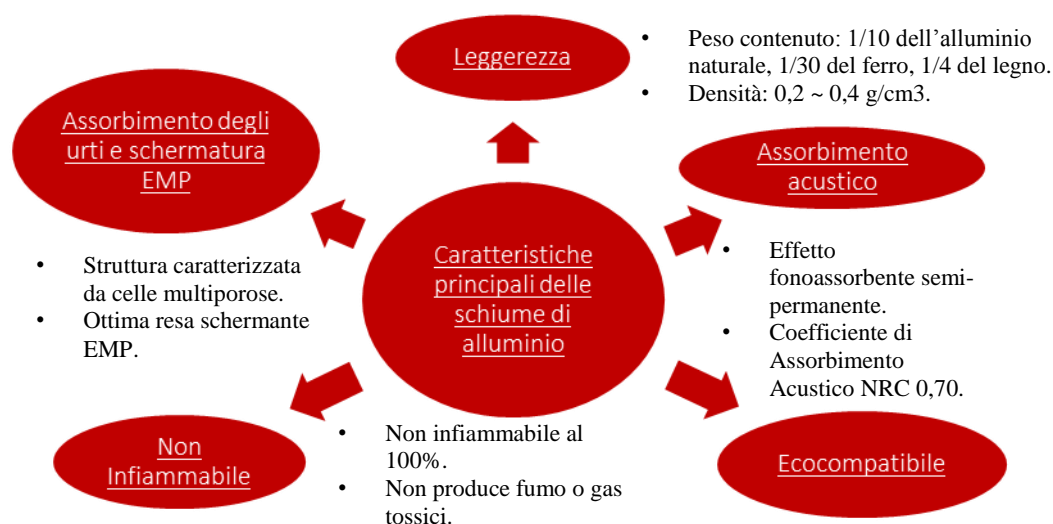


Figura 1.8 - Campi di applicazione delle schiume di Alluminio in ambito strutturale [2].

Le proprietà elencate dipendono in maniera significativa dalle caratteristiche della porosità, cosicché è possibile modificarle fino al raggiungimento di un *target* di riferimento agendo sul processo produttivo. Le caratteristiche funzionali e strutturali delle schiume metalliche dipendono dalla densità relativa della schiuma e dalla struttura e morfologia dei pori. Occorre, quindi, porre una netta distinzione tra le schiume a celle aperte e quelle a celle chiuse, Figure 1.9 - 1.10, visto che non solo i processi produttivi sono

nettamente differenti, ma soprattutto in quanto possono essere individuati campi applicativi totalmente diversi.

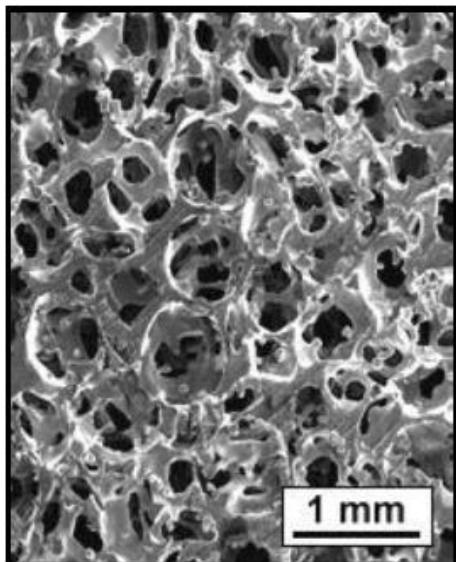


Figura 1.9 - Esempio di schiuma metallica a celle aperte

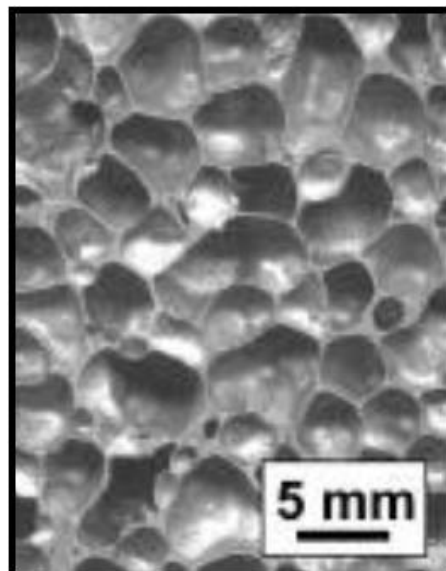


Figura 1.10 - Esempio di schiuma metallica a celle chiuse

Tutti i metalli cellulari, in generale, presentano la caratteristica di essere relativamente leggeri e posseggono una elevata rigidezza specifica: caratteristiche dovute essenzialmente alla presenza di vuoti nella struttura, mentre molte altre caratteristiche risentono in maniera preponderante dalla loro microstruttura (struttura della cella e natura delle pareti cellulari). Le schiume metalliche possono essere preparate utilizzando vari processi produttivi che influenzano in maniera sostanziale le caratteristiche. Occorre quindi porre molta attenzione alla scelta del processo produttivo adottato.

1.3 Tecniche produttive delle schiume metalliche

Esiste una grande varietà di tecniche produttive per la realizzazione delle schiume metalliche ognuna delle quali in grado di generare schiume con caratteristiche morfologiche differenti e quindi con proprietà sia meccaniche

che funzionali differenti. I vari processi produttivi attualmente sviluppati sono classificati in:

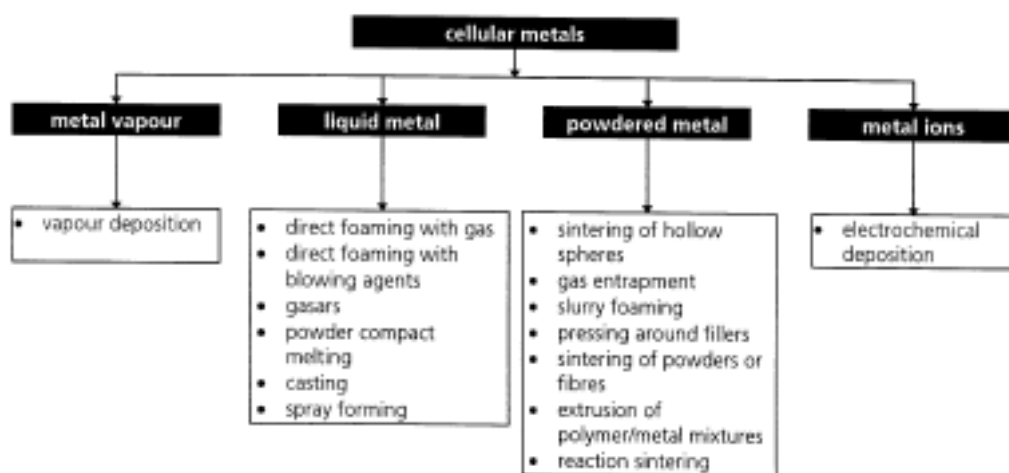


Figura 1.11 - Schema riassuntivo dei processi produttivi delle schiume metalliche e loro classificazione [2].

Occorre osservare che ognuna delle tecniche proposte è appropriata alla realizzazione di schiuma con un opportuno metallo di base e con una morfologia ben definita. La schiuma metallica più studiata, sia in ambito accademico che industriale, è quella basata sull'alluminio e le sue leghe. Le schiume metalliche sono classificate secondo i seguenti criteri:

- La condizione del metallo nella fase di formazione delle porosità (liquido, soluzione o emulsione, solido);
- Il processo di formatura utilizzato (fusione, deposizione, sinterizzazione);
- Il metodo di formazione dei pori.

Sebbene ad oggi non esista una codifica univoca per la definizione delle schiume metalliche, il miglior modo per la loro designazione prevede la definizione del processo produttivo, la composizione del metallo base, la densità apparente espressa in $[g/cm^3]$ ed infine può essere aggiunto il simbolo corrispondente al trattamento termico; per esempio: Alulight- $AlSiMgCu-0.45-T1$.

1.3.1 Realizzazione delle schiume di alluminio

Fra le varie schiume metalliche a celle chiuse prodotte, quelle che hanno maggiormente attratto l'attenzione a livello industriale sono senza dubbio le schiume metalliche composte da alluminio e sue leghe. Esistono svariati metodi per la loro realizzazione che possono essere raggruppati in due grandi categorie: i metodi che partono dal metallo fuso e quelli che invece partono dalla polveri metalliche, in Figura 1.12 sono visibili i due processi descritti e le relative aziende produttrici.

direct foaming		indirect foaming	
	melt alloy		prepare foamable precursor
	make alloy foamable		remelt precursor
	create gas bubbles		create foam
	collect foam		solidify foam
	solidify foam		
manufacturers (products)	Cymat, Canada (<i>SAF</i>) Foamtech, Korea (<i>Lasom</i>) Hütte Kleinreichenbach (HKB), Austria (<i>Metcomb</i>) Shinko-Wire, Japan (<i>Alporas</i>) (Distributor: Gleich, Germany)	manufacturers	alm, Germany (<i>AFS</i>) Alulight, Austria (<i>alulight</i>) Gleich-IWE, Germany Schunk, Germany

Figura 1.12 - Suddivisione dei più importanti processi produttivi delle schiume di alluminio ed elenco dei passaggi necessari [20].

Nei paragrafi successivi verranno esaminate le tecniche più importanti oramai consolidate in ambito industriale – molte di esse traggono il proprio nome dall'azienda che le ha studiate e le commercializza – mettendone in evidenza le peculiarità e le caratteristiche delle schiume prodotte come la densità relativa raggiungibile, la morfologia e le dimensioni delle porosità.

1.4 Formatura da liquido

La tecnica produttiva che prevede l'utilizzo del metallo fuso per la realizzazione di schiume metalliche a celle chiuse appare molto interessante in quanto permette la realizzazione di grandi quantità di materiale in modo sufficientemente economico. Inoltre attraverso tale metodo è possibile riciclare sfridi di materiale o scarti di altre lavorazioni. Per ottenere una schiuma da un metallo fuso occorre introdurre del gas al suo interno. Questo può essere fatto sia iniettando gas dall'esterno o introducendo il gas direttamente nel bagno fuso tramite la decomposizione chimica di un agente schiumogeno. Per la produzione di schiume omogenee, e quindi di buona qualità, occorre sottostare ad alcune condizioni. Se la schiuma è ottenuta dalla generazione di gas *in-situ* è necessario che l'agente schiumogeno sia uniformemente disperso nel fuso in un tempo breve a causa della veloce attivazione termica dello stesso. Inoltre, la fuga di gas durante il processo di schiumatura deve essere evitato. Una fase importante nei processi produttivi da liquido è rappresentato dall'aumento della viscosità del metallo fuso. Esistono diversi approcci per fare ciò: far avvenire il processo di schiumatura in una fase semi-liquida, introdurre delle particelle ceramiche o ossidi. L'effetto dell'aggiunta delle particelle è duplice: aumenta la viscosità del fluido e stabilizza le pareti delle celle. Passiamo in rassegna i due metodi presentati.

1.4.1 Iniezione del gas: il metodo Cymat/Alcan e Norsk Hydro.

Il metodo di schiumatura Cymat/Alcan e Norsk Hydro è un processo continuo, che prevede l'iniezione di gas nel metallo fuso sviluppato simultaneamente e indipendentemente tra la fine degli anni 80 e l'inizio degli anni 90 dalla Alcan e dalla Norsk Hydro [22–29], Figura 1.13.

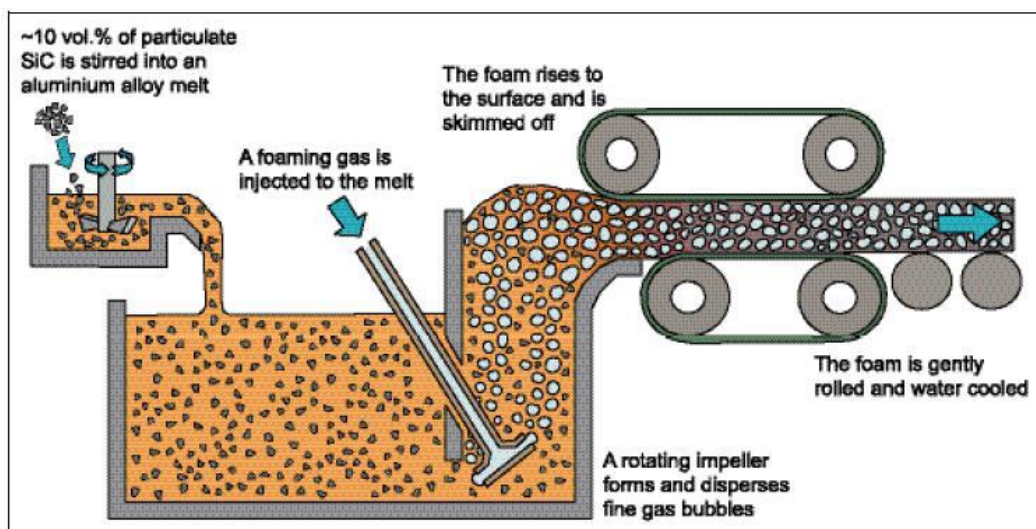


Figura 1.13 - Schematizzazione del processo produttivo per iniezione diretta del gas nel metallo fuso [7].

In questo processo un MMC composto da una lega di alluminio da fonderia o da deformazione plastica unito a particelle di SiC o Al_2O_3 con una percentuale dal 10% al 30% in volume, viene utilizzato come metallo di partenza. Questo miscuglio è liquefatto con le attrezzature in dotazione alle fonderie convenzionali e trasferito in un apposito pozzetto dove del gas, tipicamente aria, è iniettato attraverso un ugello inserito in un miscelatore rotante, così da formare una dispersione di piccole bolle di gas. La dimensione delle bolle può essere controllata agendo sul flusso di gas, sulla progettazione del miscelatore (numero di palette e loro dimensione), e la sua velocità di rotazione. Le bolle di gas generate risalgono sulla superficie del liquido dove si accumulano. Le particelle ceramiche si accumulano sulle pareti delle bolle incrementandone la stabilità e ritardando i fenomeni di coalescenza. Inoltre la loro presenza diminuisce la velocità di risalita delle bolle a causa dell'incremento di viscosità del fuso: diminuendo l'energia cinetica delle bolle in risalita si abbassa la possibilità di rotture meccaniche all'arrivo in superficie. La schiuma metallica che si è formata sulla superficie viene prelevata, ancora liquida, con un nastro trasportatore dove viene raffreddata e solidificata.

Occorre osservare che la densità relativa viene controllata tramite i parametri di processo quali velocità del rotore, flusso del gas, quantità di particelle introdotte ed, infine, condizioni di solidificazione. Questo processo permette di ottenere lastre con una densità relativa dal 2 al 20% ($0.05 - 0.55 \text{ g/cm}^3$). La dimensione media delle bolle è inversamente proporzionale alla densità relativa ed è nell'intervallo che va da 2.5 a 30 mm. Le attrezzature adottate permettono la produzione di lastre in continuo con una profondità di 1500 mm ed uno spessore da 25 a 150 mm con una capacità di 900 kg/h. questo dimostra che il processo è abbastanza semplice ed economico anche se per la sua natura è affetto da alcune problematiche quali la variazione nelle dimensioni delle celle, il gradiente di densità e l'anisotropia delle celle che risultano allungate a causa delle forze esercitate dal nastro trasportatore. In linea di principio la schiuma generata con questo metodo può essere utilizzata per la realizzazione di geometrie 2D non rettangolari e forme 3D complesse attraverso opportuna iniezione della schiuma formata in uno stampo. In Figura 1.14 è visibile una schiuma metallica ottenuta con il presente processo.

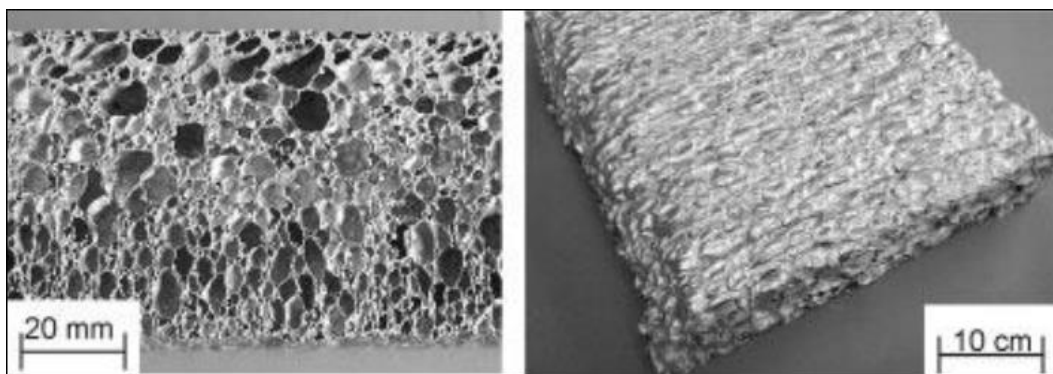


Figura 1.14 - Esempio di schiuma metallica generata con il metodo dell'iniezione di gas nel metallo fuso.

1.4.2 Generazione del gas direttamente nel metallo fuso

Il metodo dell'iniezione di gas nel metallo fuso, precedentemente descritto, presenta un problema intrinseco alla modalità realizzativa: il basso numero di bolle di dimensioni considerevoli che si generano durante il processo. Ciò comporta la formazione di una schiuma molto disomogenea con irregolarità nella forma e distribuzione dei pori. Per ovviare a questo inconveniente sono state introdotte due tecniche nelle quali il gas, responsabile della schiumatura, deriva dalla scomposizione termica di una agente solido introdotto direttamente nel metallo fuso. In questo modo è possibile incrementare il numero di nuclei di generazione delle bolle all'interno del fuso e, di conseguenza, di migliorarne la qualità morfologica.

1.4.2.1 Il metodo ALPORASTM

La Shinko-Wire Ltd. è un'azienda Giapponese che ha brevettato il metodo in questione e che commercializza la sua schiuma di alluminio con il nome di AlporasTM. Con tale metodo è possibile produrre dei blocchi di schiume metalliche di grandi dimensioni [30 – 36].

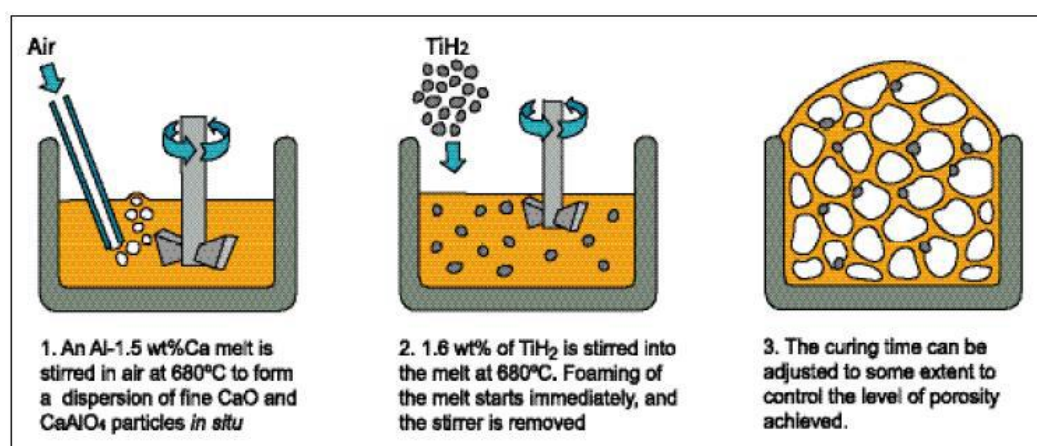


Figura 1.15 - Schematizzazione del metodo ALPORAS.

L'aggiunta e il successivo miscelamento degli elementi con una buona affinità con l'ossigeno facilita il processo di ossidazione della superficie del metallo fuso e permette di incrementare la viscosità tramite la formazione degli ossidi: CaO , Al_2O_3 e CaAl_2O_4 . L'alluminio addensato viene versato all'interno di uno stampo nel quale viene aggiunto l'1.6% di TiH_2 come agente schiumogeno. A seguito di un'ulteriore miscelatura, il TiH_2 si dissocia per effetto termico dando origine a bolle di H_2 che causano l'espansione del metallo fuso ed il conseguente riempimento dello stampo. Di seguito, la schiuma metallica che si è formata, viene raffreddata fino alla temperatura di solidificazione. Dopo la rimozione dallo stampo, un blocco di Alporas delle misure di 450 x 2050 x 650 mm x mm x mm viene tagliato in lastre. Ciò che si ottiene, l'Alporas™, è quindi una schiuma di alluminio a celle chiuse la cui densità relativa varia di 0.18 a 0.24 g/cm³, con una dimensione media delle celle di circa 4 - 5 mm, Figura 1.16. Sebbene questo metodo sia, attualmente, il più utilizzato da un punto di vista industriale per la realizzazione di pannelli, esso soffre di una limitazione notevole in quanto non è possibile estenderlo alla realizzazione di forme complesse: alcune prove in merito sono state svolte ma con scarso successo.

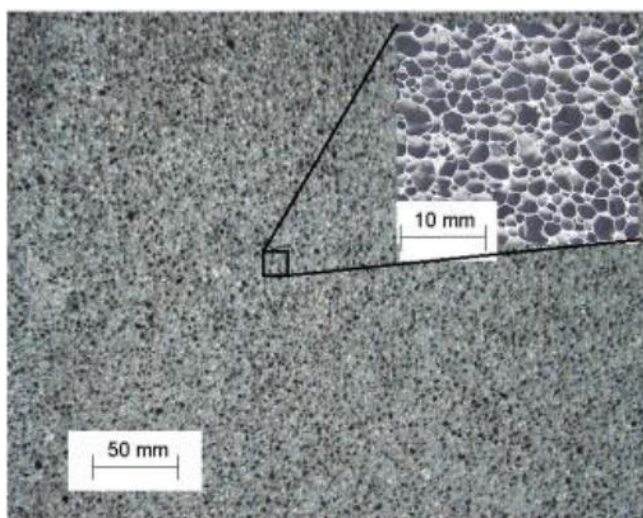


Figura 1.16 - Esempio di schiuma metallica realizzata con metodo ALPORAS™.

1.4.2.2 Il metodo FORMGRIP™

Il metodo FORMGRIP™ integra alcuni vantaggi della formatura da liquido con quelli dell'approccio basato sulle polveri metalliche. È possibile infatti realizzare un materiale precursore solido, con l'agente schiumogeno all'interno, in grado di dare origine alla schiuma in un secondo processo di fusione con il rilascio del gas direttamente nel fuso, in maniera del tutto simile a ciò che avviene nei vari metodi della metallurgia della polvere, Figura 1.17.

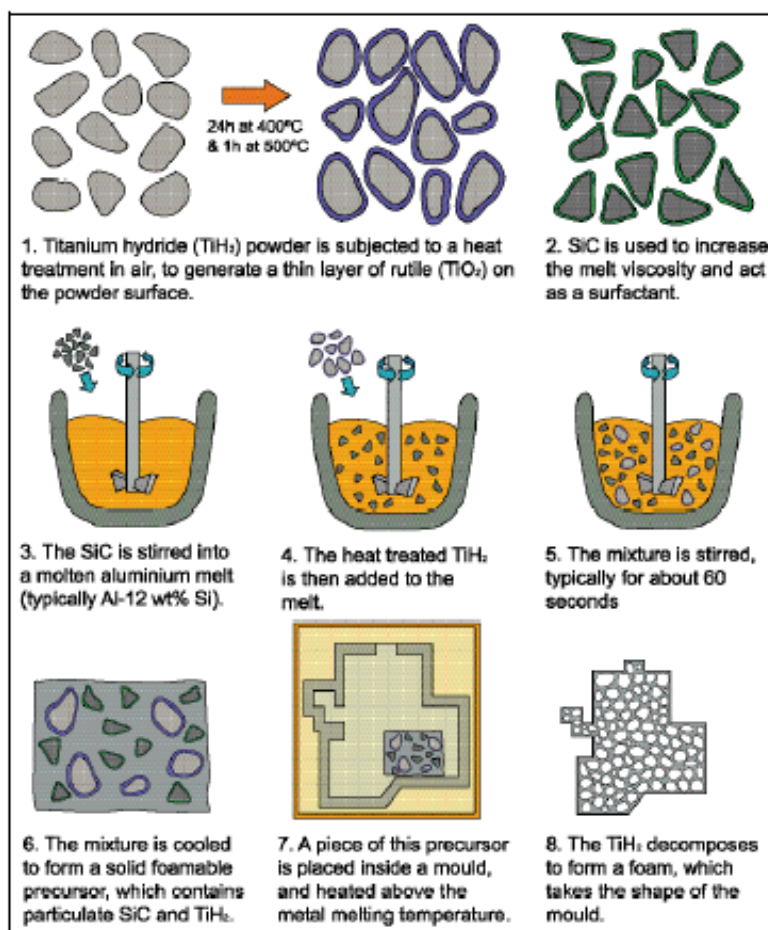


Figura 1.17 - Schema di realizzazione del processo FORMGRIP™.

Di contro il materiale precursore è preparato con un metodo che ricalca le tecniche proprie dei processi da liquido [37-40]. La preparazione del precursore prevede la dispersione di una miscela di polveri di AlSi_{12} e TiH_2 (1.5%

in peso del fuso), precedentemente trattato in una miscela fusa di AlSi_9 a cui è stato aggiunto SiC in polvere (dimensione delle particelle di $12.8 \mu\text{m}$). Il composto così ottenuto viene miscelato a 1200 rpm per un tempo di 50 – 70 s. Il punto critico in questo processo è dovuta al fatto che occorre che solo una frazione limitata dell'idrogeno introdotto venga rilasciato dall'agente schiumogeno durante la fase di preparazione del precursore. Questo fenomeno può essere controllato e limitato seguendo alcune accortezze: occorre che la temperatura del fuso sia bassa quando si introduce l'idruro di titanio ($T=620^\circ\text{C}$) e che esso presenti un'elevata viscosità dovuta alla presenza delle particelle di SiC e di ossido precedentemente formato. È importante inoltre che l'agente schiumogeno venga preventivamente trattato per ritardarne la dissociazione[41]. A tal fine si procede ad un trattamento termico della polvere di TiH_2 composto da due fasi distinte: una permanenza per 24 h a 400°C e un riscaldamento veloce di 1 h a 500°C . Tale trattamento provoca una leggera diminuzione dell'idrogeno disponibile per la schiumatura, ma, d'altro canto, permette la realizzazione di una barriera di ossido sulla superficie della polvere che rallenta la cinetica dell'evoluzione del gas. La miscela fusa ottenuta viene in seguito fusa all'interno di un'opportuna forma e raffreddata per interrompere il processo di schiumatura.

Le particelle di carburo di silicio sono importanti anche per la stabilizzazione della schiuma: in Figura 1.18 viene mostrato l'effetto stabilizzante sulle pareti cellulari dell'aggiunta di particelle ceramiche. Il precursore ottenuto non risulta un materiale compatto, ma presenta una porosità che va dal 14 % al 24 %.

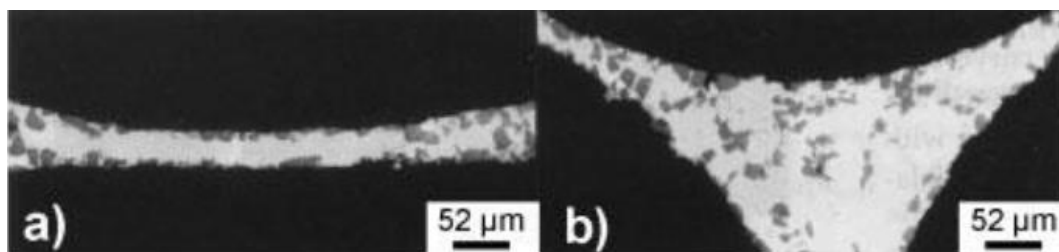


Figura 1.18 - Effetto stabilizzante del carburo di silicio sulle parti piane delle celle (a) e sui punti di giunzione (b) [37].

La seconda fase del processo FORMGRIP™ prevede il riscaldamento del precursore oltre la temperatura di *solidus*. Il risultato di tale riscaldamento è il rilascio dell'idrogeno, che si propaga all'interno delle bolle già presenti, e ne permette un'ulteriore espansione, Figura 1.19. Il diametro medio delle celle è in una relazione di proporzionalità inversa rispetto alla densità, come accade anche nel processo Cymat: ciò indica che l'espansione della schiuma è governata dalla coalescenza delle celle e che lo spessore medio delle pareti delle celle è costante. Alcuni studi su tale processo hanno dimostrato che il contenuto di SiC non influisce sulla dimensione media delle celle.

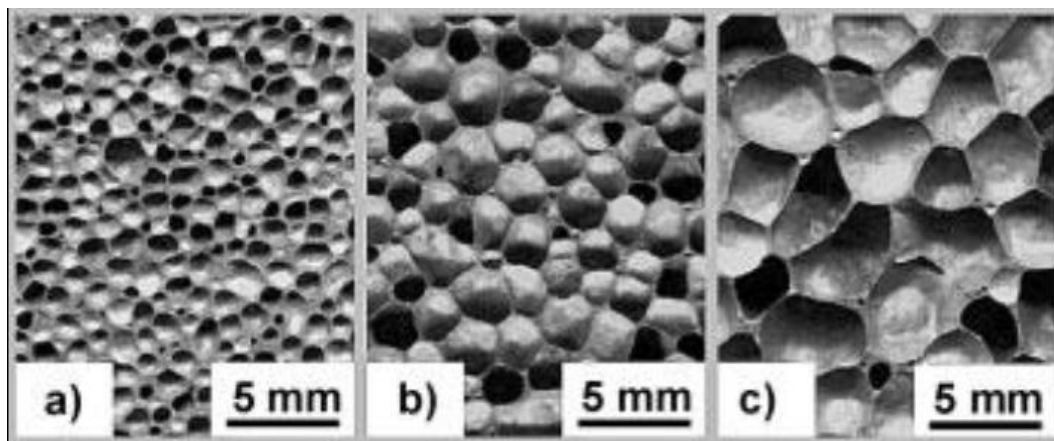


Figura 1.19 - Esempi di morfologie di schiume metalliche differenti ottenute variando i parametri di processo nel metodo FORMGRIP™ [40].

Se si analizza il processo in termini di possibilità di realizzare forme geometriche complesse e di controllo della microstruttura appare evidente che il processo in esame risulta il migliore tra quelli che si basano sulla formatura da

liquido. Inoltre non esiste la necessità di travasare la schiuma da un crogiuolo ad uno stampo durante la fase di schiumatura. Occorre osservare che è possibile anche dare una forma opportuna al precursore solido prima di compiere la fase di schiumatura vera e propria: questo può in alcuni casi migliorare notevolmente il processo di realizzazione di forme complesse. Se però si considera l'economicità del processo, esso appare notevolmente più dispendioso degli altri presentati nel paragrafo a causa del costo dei materiali utilizzati, del fatto che non è un processo continuo e della presenza di numero di step nel processo.

1.5 Formatura da polveri

1.5.1 Il processo produttivo PCM (*Powder Compact Melting*)

Il processo produttivo, utilizzato nel presente lavoro, è quello a partire dalle polveri. Tale processo, definito PCM (*Powder Compact Melting*) è stato messo a punto presso l'Istituto Fraunhofer di Brema. Il primo passo consiste nel mescolare in opportune proporzioni le polveri del metallo di cui si intende produrre la schiuma con quelle di un agente schiumante e di un composto stabilizzante, SiC.

Una volta compattata la miscela per estrusione, il precursore viene scaldato ad una temperatura superiore a quella di fusione del metallo, dove il gas prodotto dalla decomposizione dell'agente schiumante formerà bolle nel fuso. La figura seguente mostra schematicamente le fasi del procedimento nel caso di Al, dove l'agente schiumante è TiH_2 mentre particelle di SiC vengono aggiunte per modificare la viscosità del fuso e stabilizzare la schiuma.

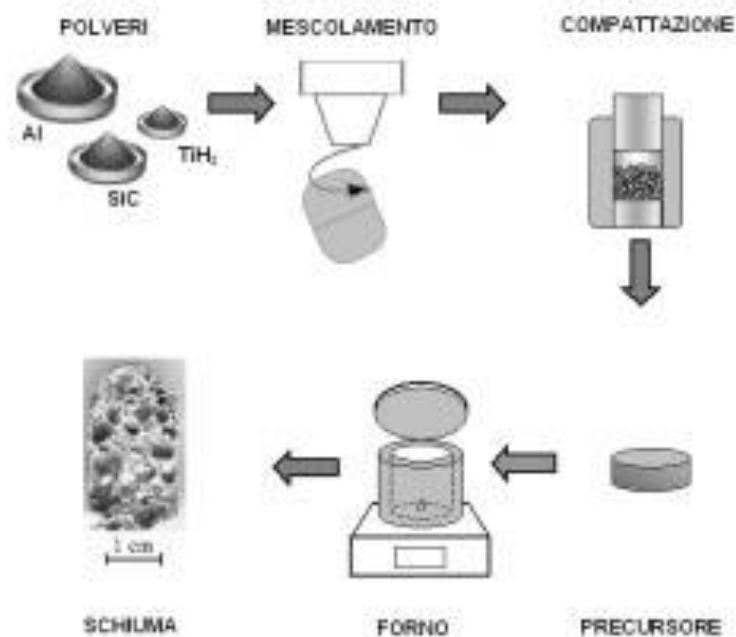


Figura 1.20 - Schematizzazione dell'intero processo di powder compact melting

La formazione di una schiuma metallica presenta un complicato scenario dove più processi fisici (nucleazione, crescita, coalescenza e galleggiamento delle bolle, drenaggio e altri movimenti del metallo liquido, dispersione delle particelle nel fuso) sono presenti e strettamente collegati tra loro. Il drenaggio è costituito dal flusso di liquido che per gravità passa attraverso la struttura della schiuma dall'alto verso il basso, ossia l'alluminio tende a stratificarsi in basso, come è evidenziato in Figura 1.21.

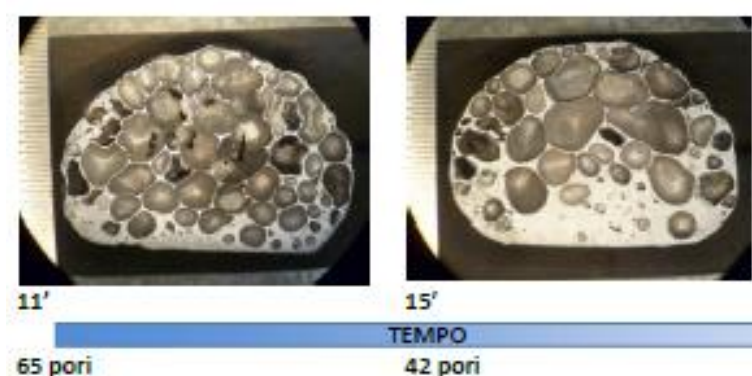


Figura 1.21 - Sezione di due schiume nelle quali è evidente l'effetto del tempo sul numero di pori



Come conseguenza, la parte superiore della schiuma tende ad asciugarsi, le pareti delle bolle si assottigliano e si rompono più facilmente dando luogo ad ingrossamento e coalescenza.

Capitolo 2 Realizzazione della schiuma di alluminio a celle chiuse mediante PCM

2.1 Realizzazione della schiuma di alluminio

I principali parametri del processo PCM (Powder Compact Melting), ampiamente descritto nel paragrafo 1.5.1, sono i seguenti:

1. La composizione della miscela di polveri;
2. La dimensione e forma delle particelle che la compongono;
3. Le modalità di mescolamento delle polveri;
4. La pressione e la temperatura di compattazione della miscela;
5. La temperatura del fuso durante il processo di formazione delle schiume, ossia la temperatura di schiumatura;
6. La velocità con cui questa temperatura è raggiunta;
7. Il tempo di permanenza alla temperatura di lavoro, ossia il tempo di schiumatura;
8. L'atmosfera e la pressione sul fuso;
9. La velocità di raffreddamento.

Si analizzano i vari punti di interesse più nello specifico:

Punto 1 e 2: Per la produzione delle schiume si possono utilizzare polveri di Al 99.5 % (diametro medio delle particelle 45 μm), TiH_2 (diametro medio 5

μm) e SiC (diametro medio $37 \mu\text{m}$). La morfologia di tali polveri è rappresentata in figura seguente.

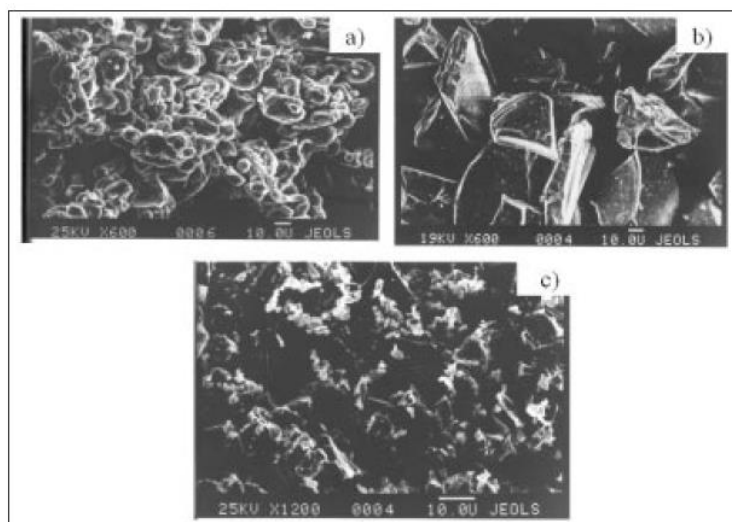


Figura 2.1 - a) polveri di Al, b) polveri di TiH_2 , c) polveri di SiC.

Possono essere considerate diverse composizioni della miscela di polveri variando il contenuto di TiH_2 nell'intervallo 0.1-0.8 (% in peso) e di SiC nell'intervallo 0.8-9 (% in peso) realizzando numerosi gruppi di campioni con TiH_2 . Possono anche essere utilizzate miscele che non contengano particelle di SiC. In fase di realizzazione è stato utilizzato un precursore avente lo 0.8% in peso di agente schiumante (TiH_2).

Punto 3: La miscelazione è un'operazione che avviene in fase solida, in un impianto opportuno: il miscelatore. Se ne riporta in figura seguente una delle possibili configurazioni: il miscelatore a Y che è quello utilizzato nel dottorato di ricerca. Esso mira a conseguire una dispersione omogenea delle particelle, in particolare di quelle di agente schiumante. Questo per rendere possibile la formazione di una distribuzione omogenea di bolle all'interno della schiuma, durante il processo di schiumatura, e quindi nel prodotto finito.



Figura 2.2 - Miscelatore a Y

Punto 4: La compattazione della polvere può avvenire attraverso diverse tecniche purché sia garantito il raggiungimento di un certo grado di compattazione, superiore al 97%, in maniera che il gas rilasciato dal precursore schiumogeno venga intrappolato all'interno della matrice metallica nella fase iniziale del processo di schiumatura, quando il materiale precursore è in uno stato solido rammollito, ma non ancora liquido.

Un modo per ottenere un precursore solido con una densità che ben approssima quella teorica del 100% è di utilizzare, in maniera combinata, un processo CIP (Cold Isostatic Pressing) seguito da un processo di estrusione.

Inizialmente, si esegue un processo CIP: la polvere viene caricata in un contenitore a pareti flessibili che viene posto nella camera ove viene fatto fluire il liquido che trasmette la pressione (25-250 MPa). Un'alternativa all'utilizzo della polvere è l'introduzione nel recipiente di un compatto crudo, ottenuto tramite pressatura uniassiale: in questo modo si migliora la compattazione del pezzo.

Malgrado la maggiore lavorabilità del pezzo crudo, il difetto del sistema consiste nel fatto che le superfici dell'oggetto restano poco rifinite e che i ritmi di produzione sono piuttosto limitati, con una temperatura di 350° C, per



consolidare il mix di polveri precedentemente ottenuto, dando origine ad una billetta con densità relativa del 70 – 80% e della massa di circa 50 kg. Le billette così ottenute possono essere utilizzate nel successivo processo di estrusione.

Si può anche eliminare il processo di CIP ed estrarre direttamente la miscela di polveri, facendo però attenzione a non contaminare la polvere con agenti esterni e a non incorrere in fenomeni di *de-mixing*.

Non è possibile, invece, ottenere una schiuma direttamente dalla billetta ottenuta dal CIP in quanto, come sottolineato in precedenza, il grande contenuto di porosità causerebbe una massiccia perdita di idrogeno nel riscaldamento del materiale.

Le polveri possono essere compattate anche attraverso una sorta di “estrusione continua”. In questa tecnica, un rullo viene utilizzato per portare la polvere in una camera di consolidamento, dalla quale viene espulso radialmente sotto forma di un filo compatto.

È possibile ottenere un precursore solido anche utilizzando una tecnica decisamente più semplice, che è quella della compattazione uniassiale a freddo delle polveri (Figura 2.3).

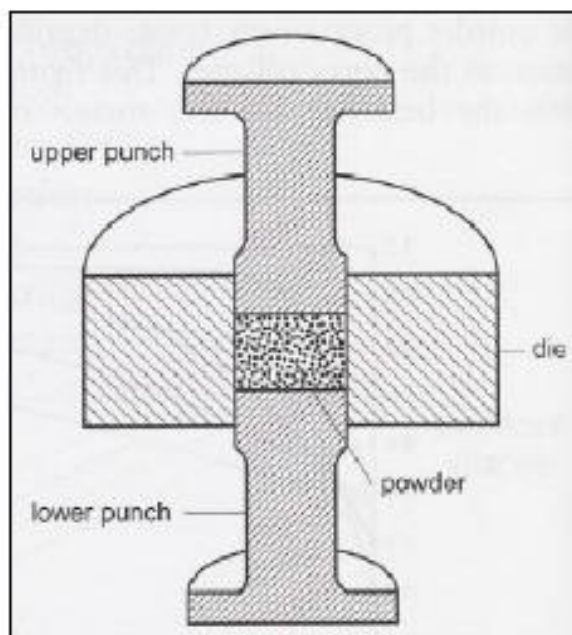


Figura 2.3 - Compattazione uniassiale a freddo

In questa tecnica, la compattazione della miscela di polveri avviene a temperatura ambiente all'interno di uno stampo, opportunamente sagomato, a mezzo di una pressa idraulica sotto una pressione uni-assiale di almeno 250 MPa.

Il processo ha degli svantaggi intrinseci che sono rappresentati dalla densità relativa più bassa, rispetto ai metodi precedenti, a meno di non utilizzare presse idrauliche ad elevato tonnellaggio. Inoltre, non è possibile ottenere precursori di grandi dimensioni e il processo di realizzazione appare piuttosto lento, in quanto ogni precursore viene compattato singolarmente.

Sebbene queste considerazioni rendano questo processo di scarso interesse da un punto di vista industriale, esso appare come molto appetibile in ambito di ricerca. Con tale metodo, infatti, non si necessita di costose attrezzature quali quelle necessarie per il CIP e per l'estrusione, ma è necessaria solamente una pressa idraulica, automatica o meno, ed uno stampo con una

cavità opportuna permettendo in maniera abbastanza rapida un cambio di formato.

La fase di compattazione deve garantire la rottura del sottile strato d'ossido che ricopre le particelle di alluminio e una densità del precursore tale da trattenere gas sufficiente per la formazione delle bolle. Come mostrato in Figura 2.4, con valori inferiori di pressione applicata il processo di formazione della schiuma o si arresta in una fase iniziale (45 MPa) o dà luogo a difetti (95 MPa). Per pressioni applicate inferiori a 45 MPa non si riesce ad ottenere un fuso poiché non avviene la rottura dello strato d'ossido.

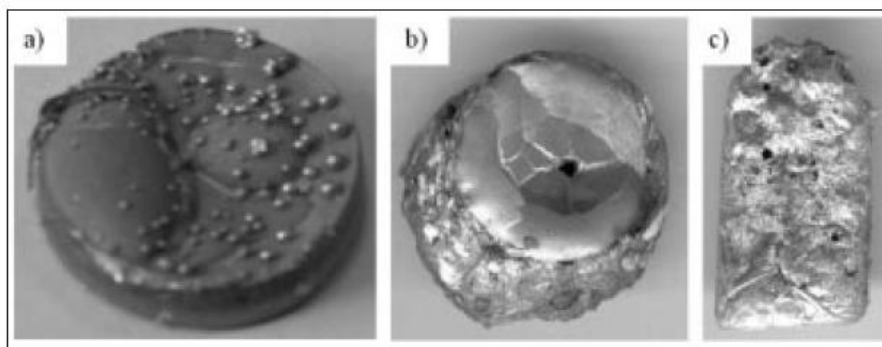


Figura 2.4 - Effetto della pressione di compattazione sulla formazione della schiuma: a) 45MPa, b) 95MPa, c) 250MPa

Punto 5: Per produrre la schiuma, il precursore viene posto nell'apposito stampo e quindi entrambi inseriti nel forno.

Bisogna stabilire la temperatura alla quale effettuare la schiumatura, e per quanto tempo essa dovrà restare costante (tempo di schiumatura).

La temperatura si sceglie, di solito appena superiore a quella di fusione del metallo/ lega di cui è composto il precursore, ma non oltre, poiché la viscosità del materiale, quando sarà allo stato liquido, diminuisce all'aumentare della temperatura. Quindi:

- Se il precursore è stato ottenuto da polveri di alluminio al 99.5%, mentre il restante da polveri di idruro di titanio e SiC, la temperatura di

schiumatura è di circa 700°C, appena superiore a quella di fusione dell'alluminio: 660°C.

Questa temperatura permette di avere una buona viscosità del fuso limitando così il fenomeno del drenaggio, ossia che il flusso di metallo vada verso il basso per gravità.

Se, invece, si utilizza una temperatura di schiumatura, come visibile in Figura 2.5, pari ad a) 800°C o b) 750°C, riducendo quindi la viscosità dell'alluminio fuso, le schiume realizzate presenteranno bolle disomogenee e di grande dimensioni.

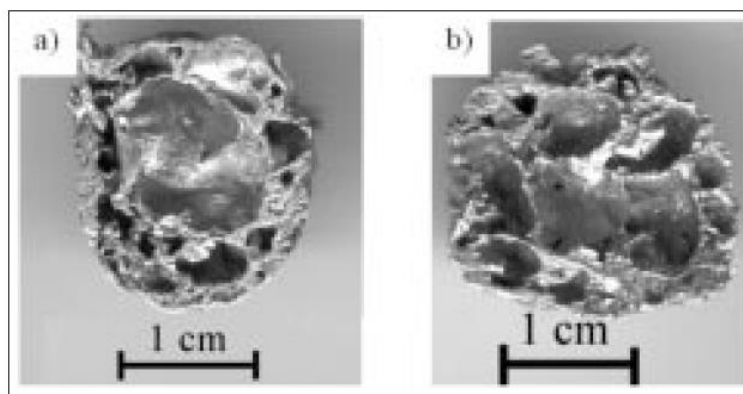


Figura 2.5 - Schiume nelle quali si evince l'effetto di una temperatura di schiumatura eccessiva.

- Se il precursore è un precursore commerciale Alulight® eutettico di tipo AlSi10 contenente lo 0.8% in massa di agente schiumante (TiH_2), la temperatura di schiumatura è all'incirca di 620°C, di 43°C superiore di quella di fusione della lega eutettica: 577°C, come visibile in Figura 2.6.

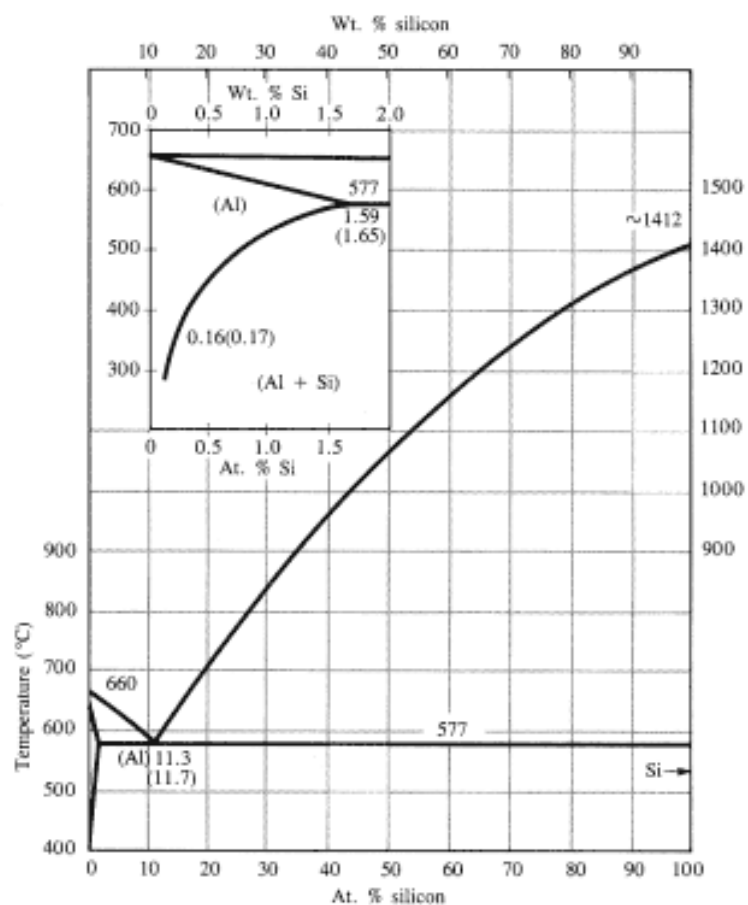


Figura 2.6 - Diagramma di stato Al-Si

Il precursore utilizzato nelle prove è un precursore eutettico prodotto da Alulight® AlSi₁₀, ottenuto unendo polveri di alluminio al 90% e silicio al 10%, contenente lo 0.8% in massa di agente schiumante (TiH₂), a cui è data la forma di barretta tramite estrusione, come visibile Figura 2.7.



Figura 2.7 - Barrette di precursore utilizzato per le prove sperimentali

Punto 6: Per caratterizzare la velocità con la quale bisogna raggiungere la temperatura di schiumatura, bisogna tenere conto che già a circa 400°C inizia il processo di dissociazione dell'idruro di titanio, con conseguente rilascio di idrogeno gassoso e quindi la formazione dei primi pori quando il materiale è allo stato solido. Nei primi momenti della formazione della schiuma di Al le immagini radioscopiche mostrano vuoti allungati, simili a cricche perpendicolari alla direzione di compattazione, che solo in seguito con l'espansione della schiuma diventano equiassici.



Figura 2.8 - Sezioni di schiume nelle quali si evidenzia la nascita dei primi pori già nella fase solida, a partire dai 400°C

Per evitare un'eccessiva dispersione dell'idrogeno nella fase di riscaldamento del precursore è stato utilizzato un tempo pari a 120s per raggiungere la temperatura di schiumatura.

Punto 7: Bisogna definire il tempo di schiumatura, ossia il tempo durante il quale resta costante la temperatura prefissata. Nel suddetto articolo, si indica un tempo di 180 s con un temperatura di schiumatura di 700°C.

Punto 8 e 9: Caratterizzando la velocità di raffreddamento, sembrerebbe bastare il raggiungimento della temperatura di solidificazione dell'eutettico ossia il periodo di tempo che trascorre dalla fine del processo di schiumatura al raggiungimento della temperatura di solidus (577°C) da parte della schiuma, per considerare effettuato il raffreddamento della schiuma, ma bisogna considerare che lo schiumaggio, ossia la reazione di dissociazione del TiH_2 , si arresta al di sotto dei 400°C circa.

2.2 Equipaggiamento utilizzato per realizzare prove di schiumatura

2.2.1 *Stampo*

Necessario per compiere prove di schiumatura è lo stampo, il quale è stato progettato e realizzato al fine di garantire al privino una forma cilindrica. Lo stampo è un parallelepipedo di acciaio, con una cavità cilindrica all'interno, composto da 4 parti assemblabili, che sono facilmente individuabili nell'esploso di Figura 2.9.

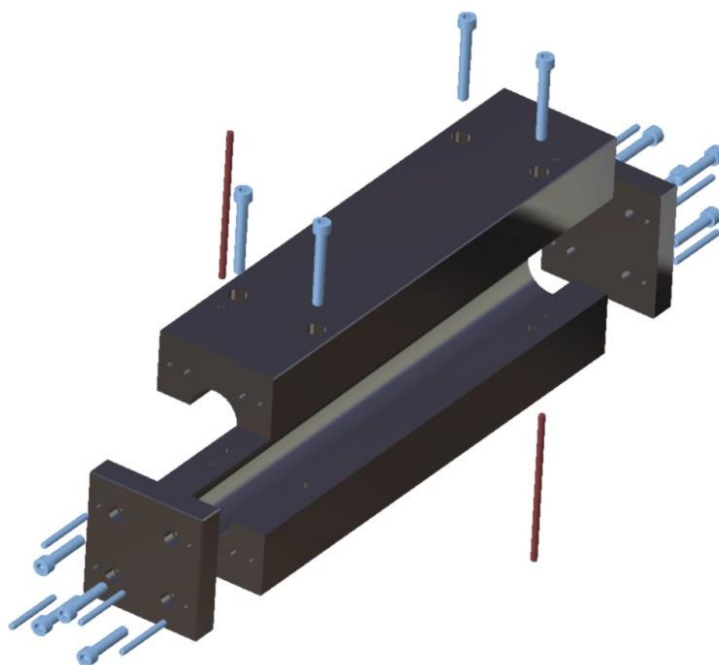


Figura 2.9 - Esploso dello stampo

Come si nota dalla figura, le parti che lo compongono sono due metà speculari che, montate, formano la superficie laterale della cavità cilindrica, e 2 piastrine a base quadrata, che assemblate forniscono i cerchi di base del cilindro. Le piastrine sono entrambe avvitate a una delle metà, di modo che lo stampo pronto per essere utilizzato abbia una sola metà mobile, ossia quella superiore Figura 2.10.



Figura 2.10 - Vista dall'alto dello stampo

In questo modo è possibile inserire il precursore all'interno della cavità semicilindrica inferiore, della quantità necessaria per ottenere una schiuma della densità voluta, e chiudere lo stampo ponendo al di sopra l'altra metà Figura 2.11.



Figura 2.11 - Stampo assemblato

Utilizzando le viti e le spine si possono serrare tra loro tutte le parti, in modo che la schiuma non fuoriesca dalla superficie di contatto delle due metà,

e centrarle, in modo da avere un cilindro “perfetto”. Le dimensioni caratteristiche delle due metà sono:

- Lunghezza 400mm;
- Diametro cavità interna 40mm;
- Volume cavità 502 400mm³.
- Mentre le dimensioni caratteristiche delle piastrine sono:
- Lato della base quadrata 97mm;
- Spessore 20mm.

Quest'ultima dimensione è importante in quanto su ciascuna piastrina è presente un foro di 2mm di diametro, concentrico con la base circolare della cavità cilindrica. Tale foro deve essere attraversato dalla schiuma in fase di formazione fino a fuoriuscire all'esterno e palesarsi agli occhi dell'osservatore. Tale fenomeno viene utilizzato come strumento visivo per verificare quando interrompere il processo di schiumatura. Ciascuna delle due metà ha una massa di circa 12kg, mentre ognuna delle 2 piastrine ha una massa di 1.340Kg, per una massa complessiva dell'intero stampo di circa 26,680Kg.

2.2.2 Forno

E' uno degli strumenti utilizzati che merita una certa attenzione, in quanto il suo funzionamento influenza la riuscita della prova di schiumatura. Il forno utilizzato per la prova (Figura 2.12) è il modello C290 della Nabertherm, che può lavorare in un intervallo di temperature che va da un minimo di 30°C a un massimo di 3000°C.



Figura 2.12 – Forno

Come si evince dal display (Figura 2.13) occorre settare alcuni parametri.

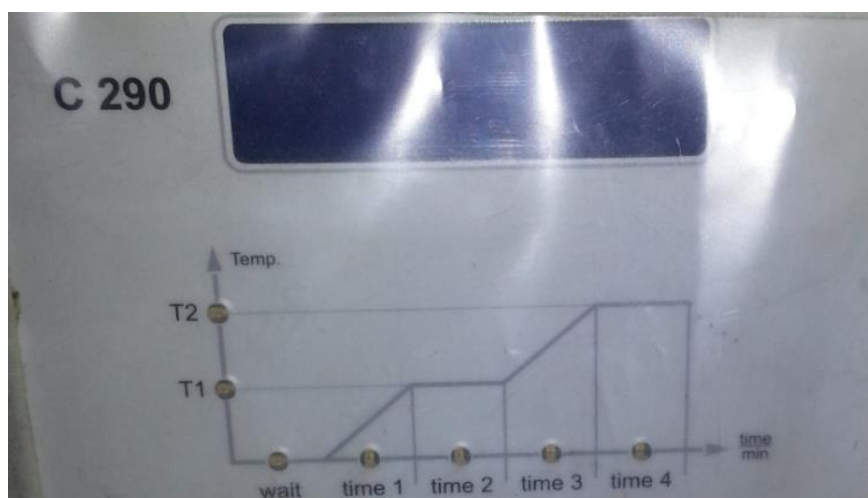


Figura 2.13 - Display forno

Più nel dettaglio:

- *Wait*: intervallo di tempo che si può definire se vogliamo che il forno inizi a funzionare dopo un certo tempo, da stabilire;
- *Time 1*, *time 3*: intervalli di tempo che definiamo se vogliamo che la temperatura raggiunga le temperature di regime, rispettivamente, T1 e T2, con una certa velocità; ossia fissando rispettivamente questi due

intervalli di tempo, si fissa il gradiente di temperatura che realizzerà il forno per raggiungere le due temperature finali. Laddove non vengano definiti il forno raggiungerà tali valori nel minor tempo possibile;

- *Time 2, time 4*: intervallo di tempo che definiamo se vogliamo che all'interno del forno resti costante, una volta raggiunta, la temperatura di regime, rispettivamente T1 e T2.

2.2.3 Termometro

Il termometro utilizzato è un termometro misuratore a doppio canale di dati, modello RS-1316 mostrato in Figura 2.14.

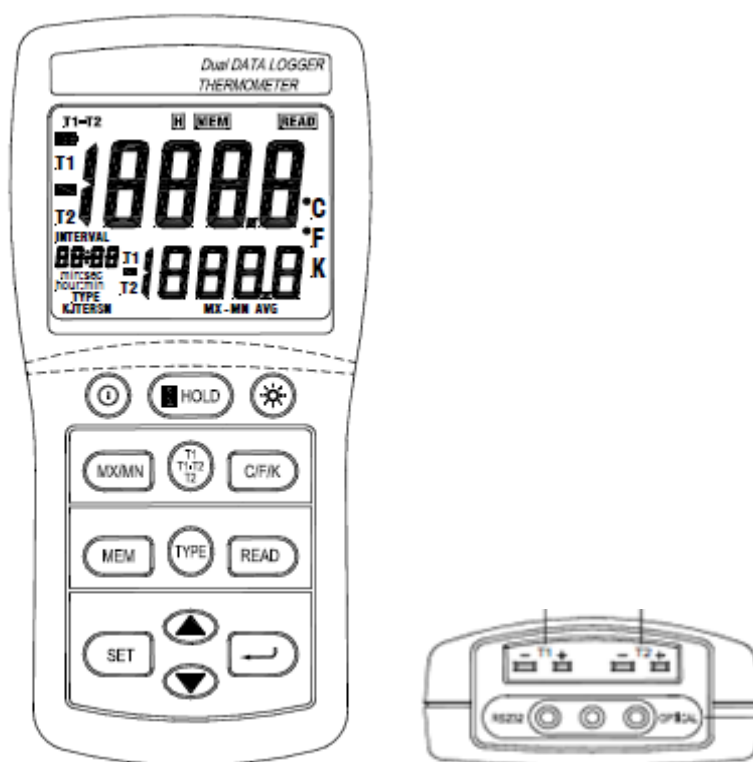


Figura 2.14 – Termometro

Utilizza come sensore di temperatura termocoppie di vari tipi: J, K, T, E, N, R, S. Per le prove eseguite si è utilizzato una termocoppia di tipo K.

L'intervallo di misurazione del termometro utilizzando tale tipologia di sensore è da -150°C fino $+1370^{\circ}\text{C}$ (-200°F fino 1999.9°F), e quindi siamo all'interno del range di temperature necessarie per lo svolgimento della prova di schiumatura.

Velocità di misurazione: una volta ogni secondo e mezzo
(1volta/1,5secondi \Leftrightarrow 0,66 volte/secondo)

Temperatura tollerabile per un buon funzionamento $0\div 50^{\circ}\text{C}$.

Quest'ultimo dato è molto importante per la corretta rilevazione delle temperature nella fase di raffreddamento.

In questa fase infatti, il portellone del forno viene totalmente aperto per rendere il raffreddamento quanto più rapido possibile, e quindi il termometro non deve essere investito dall'aria calda fuoriuscente dal forno.

2.3 Set up del processo produttivo

Nella realizzazione dei provini sono stati posti i seguenti obiettivi:

- Compiere considerazioni sullo stampo, ossia caratterizzarne l'andamento temporale delle temperature a vuoto (senza inserire il precursore);
- Effettuare prove di schiumatura, con l'obiettivo di determinare la temperatura cui si debba impostare il forno, in modo che lo stampo e il precursore, ivi contenuto, raggiungano la temperatura di schiumatura nel minor tempo possibile e vi rimangano per tutto il tempo necessario affinché si formi la schiuma;
- Caratterizzare la rampa di discesa della temperatura dello stampo con all'interno la schiuma formatasi, durante la fase di raffreddamento.

- Verificare la ripetibilità delle prove, e ottimizzarne i parametri caratteristici.

Si è stabilita come TEMPERATURA DI SCHIUMATURA = $620 \div 630$ °C, per i motivi esposti precedentemente.

2.3.1 Caratterizzazione termica dello stampo in funzione del tempo

Nella fase di riscaldamento del precursore, già intorno ai 400°C inizia la reazione di dissociazione dell'idruro di titanio e quindi la prima formazione di pori nella fase disperdente solida. Finché il materiale resta solido, le porosità si manifesteranno come fessure nelle quali si trova un gas, l'idrogeno, a una pressione sempre maggiore, a causa dell'aumento della temperatura.

Da quando il materiale diventa semiliquido tali fessure si espandono repentinamente per l'elevata pressione, formando le prime porosità, e poi gradualmente all'aumentare della temperatura.

Più il materiale staziona a tali temperature, dai 577°C ai 620°C, e più le porosità diventeranno grandi.

Per evitare che le bolle raggiungano dimensioni eccessive, e quindi affinché la schiuma, che si realizza utilizzando il 'metodo delle polveri', abbia delle buone proprietà meccaniche, bisogna raggiungere la temperatura di schiumatura in un tempo quanto più possibile breve.

A questo scopo ci siamo interessati di analizzare l'inerzia termica dello stampo utilizzato in queste prove, ossia di calcolare in quanto tempo esso raggiunga la temperatura desiderata, e se conviene inserirlo a forno già a regime o a forno freddo.

Affinché lo stampo raggiunga circa 620°C bisogna impostare il forno in modo che la temperatura massima della rampa di salita sia 700°C (per i motivi esposti in seguito) e senza specificare in che tempo si desidera raggiungere tale

risultato, in modo che, automaticamente, verrà utilizzato il gradiente di temperatura più grande possibile, e quindi raggiungendo tale temperatura nel minor tempo possibile.

Osservando il grafico di Figura 2.15, si osserva che affinché esso raggiunga i 700°C, a partire da temperatura ambiente, con lo stampo all'interno, e quindi quest'ultimo raggiunga 628°C, occorrono 77 minuti.

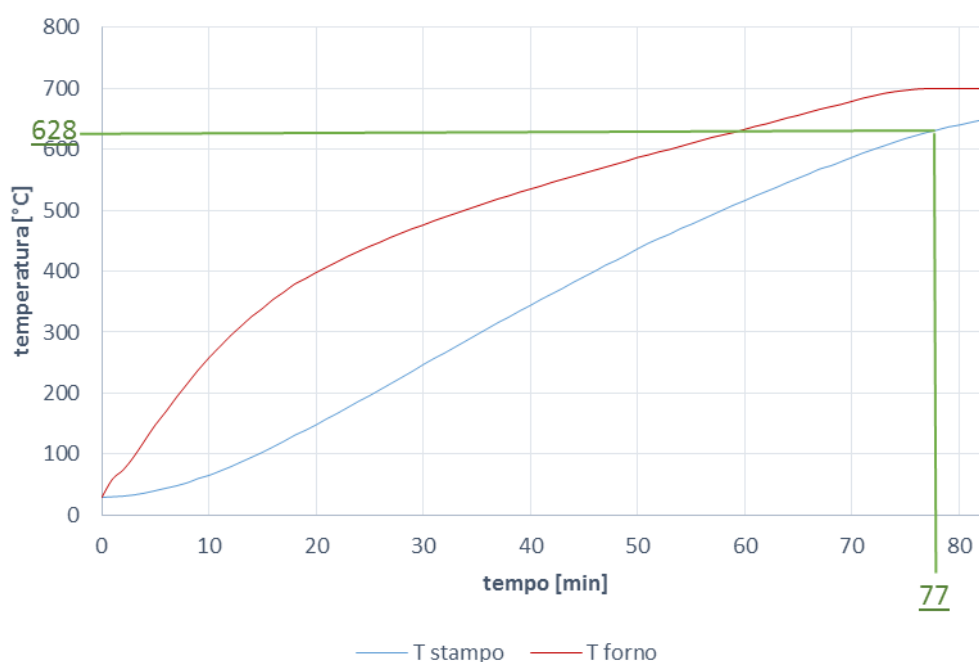


Figura 2.15 - Andamento delle temperature di forno e stampo, se si inserisce quest'ultimo nel primo a temperatura ambiente

Si può pensare che potrebbe risultare conveniente inserire lo stampo a forno già caldo. Quindi impostando la temperatura del forno a 800°C, anziché 700°C poiché si era messo in conto che nel lasso di tempo in cui il portellone fosse stato aperto per inserire lo stampo, si avrebbe avuto un calo della temperatura nell'ambiente interno del forno.

Analizzando il grafico di Figura 2.16 si osserva che lo stampo viene inserito al minuto 70.

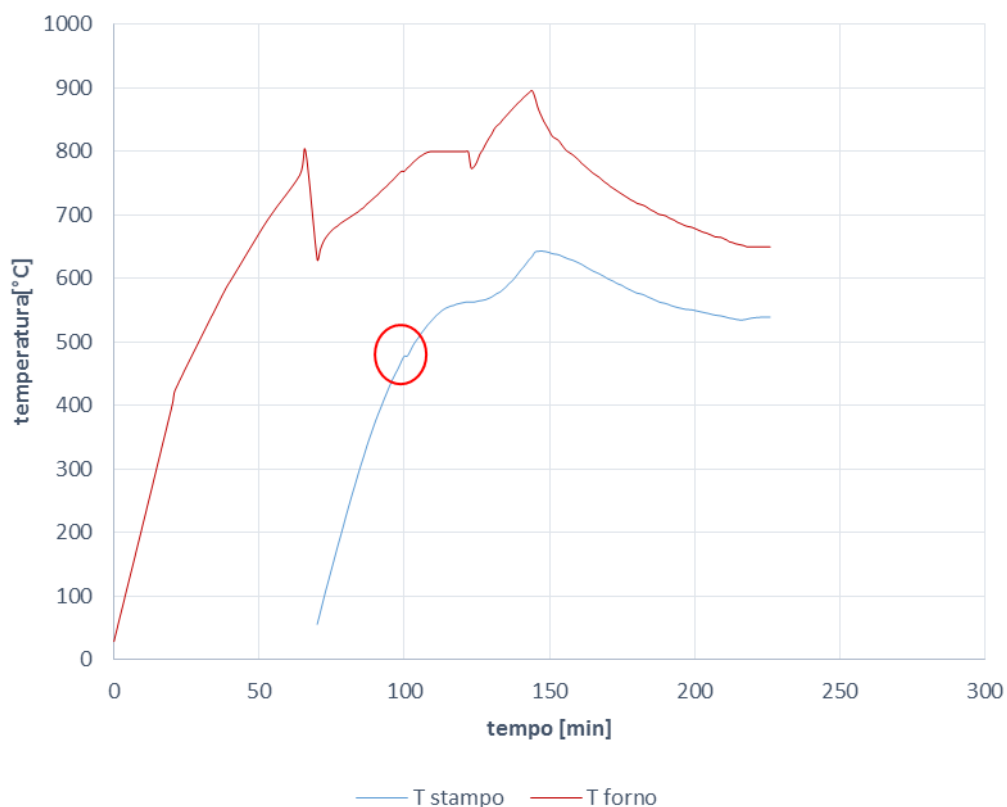


Figura 2.16 - Andamento delle temperature di forno e stampo, se si inserisce quest'ultimo nel primo a temperatura di regime: 800°C.

Il forno è stato aperto per un tempo non molto breve, in quanto lo stampo è pesante e poco agevole negli spostamenti, e inoltre avvicinarsi alla zona calda è pericoloso per la propria salute.

Durante l'inserimento l'ambiente caldo è sceso a una temperatura di 630°C.

Si nota che quando il forno arriva di nuovo a 800°C, la curva in blu passa da un andamento pressoché lineare a uno approssimabile con una cubica. Tale variazione è stata cerchiata in rosso all'interno della Figura 2.16 e palesa una riduzione del gradiente di temperatura dello stampo.

Per tale motivo è stato riprogrammato il forno, impostando come temperatura massima 900°C.

Si osserva, sempre in Figura 2.16 che lo stampo ha impiegato circa 73 minuti a raggiungere 630°C.

In realtà si potrebbe pensare che se si fosse impostato da subito il forno a 900°C si sarebbe potuta raggiungere prima di 73 minuti, e all'incirca in 63 minuti, la temperatura di 630°C. Tuttavia questa non è una strada percorribile per motivi pratici.

A causa dell'elevato peso dello stampo, per inserirlo nel forno, è possibile avvicinarlo tramite un carrello (vedi Figura 2.17) e poi spingerlo all'interno del forno, tramite un'asta d'acciaio.



Figura 2.17 - Carrello su cui sono poggiati carrellino e stampo

Il problema è che nello strisciare, i cuscinetti, adibiti a rotelline dell'appoggio su cui è alloggiato lo stampo, danneggerebbero il materiale refrattario cerchiato in rosso (Figura 2.18).



Figura 2.18 - In rosso è stato cerchiato il materiale refrattario che rischia di essere danneggiato nell'inserimento dello stampo

Infatti, a causa dell'elevato peso dello stampo, tali cuscinetti non riescono a rotolare senza strisciamento. Bisognerebbe quindi apporre sulla zona a rischio una protezione d'acciaio, che comporterebbe un avvicinamento eccessivo di una persona alla sorgente calda.

Bisogna ora decidere come impostare il forno. A questo scopo analizziamo la prova a vuoto, con stampo inserito nel forno senza precursore

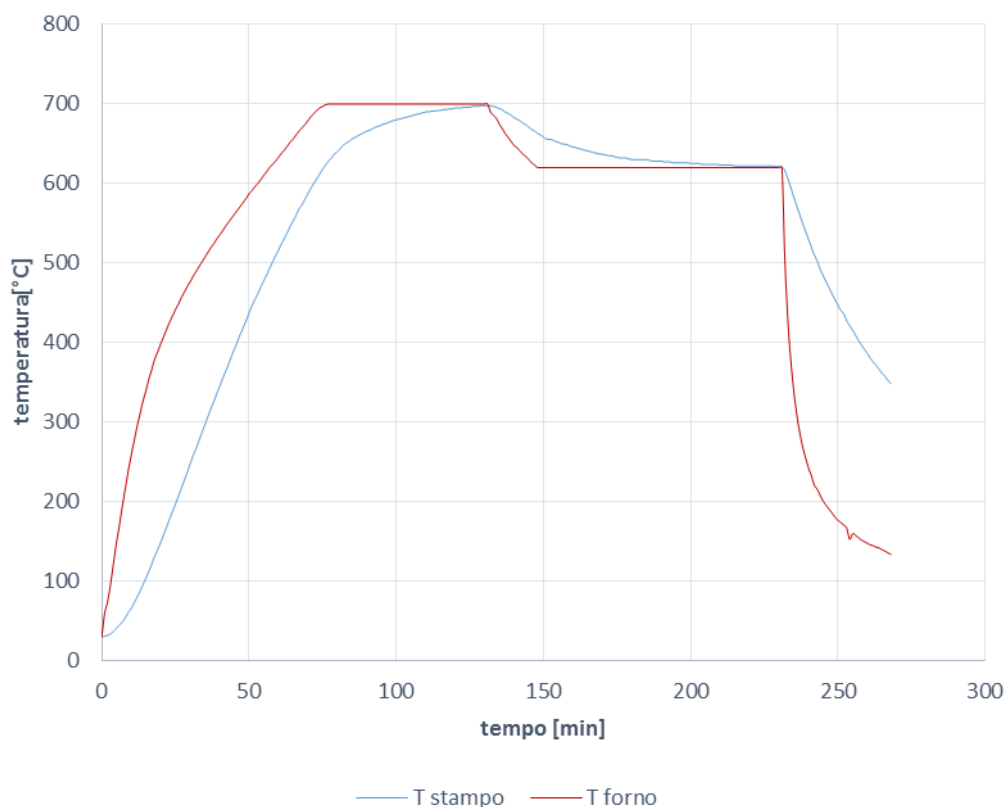


Figura 2.19 - Grafico della prova a vuoto

Dal grafico di Figura 2.19 si nota che l'andamento della temperatura dello stampo è pressoché lineare fino al momento in cui il forno raggiunge la temperatura di regime, dopo di che assume un andamento come mostrato nello zoom di Figura 2.20.

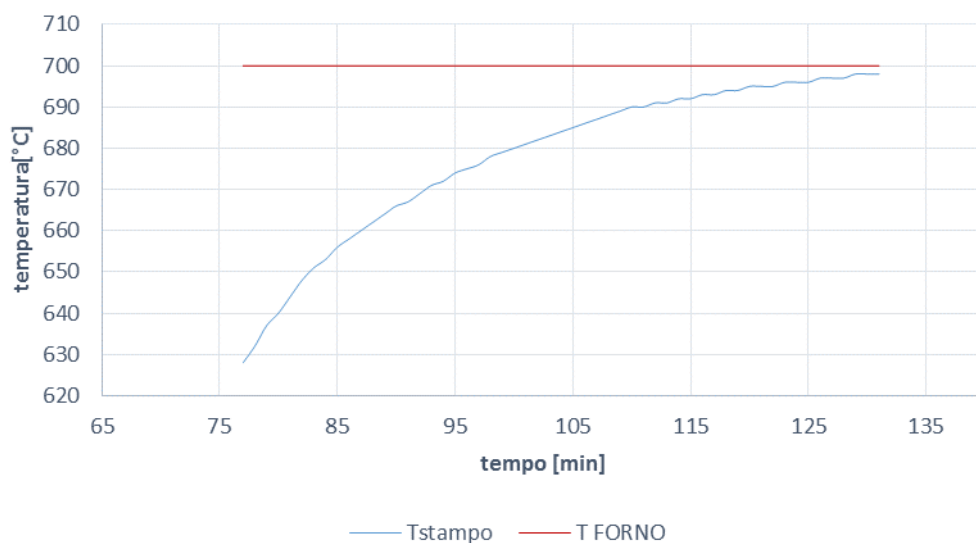


Figura 2.20 - Zoom del grafico di Figura 2.19 quando la temperatura del forno diventa costante.

È possibile notare che tale andamento della Tstampo può essere approssimato con quello di una cubica, come visibile nel grafico di Figura 2.21, nel quale si riporta anche la sua equazione.

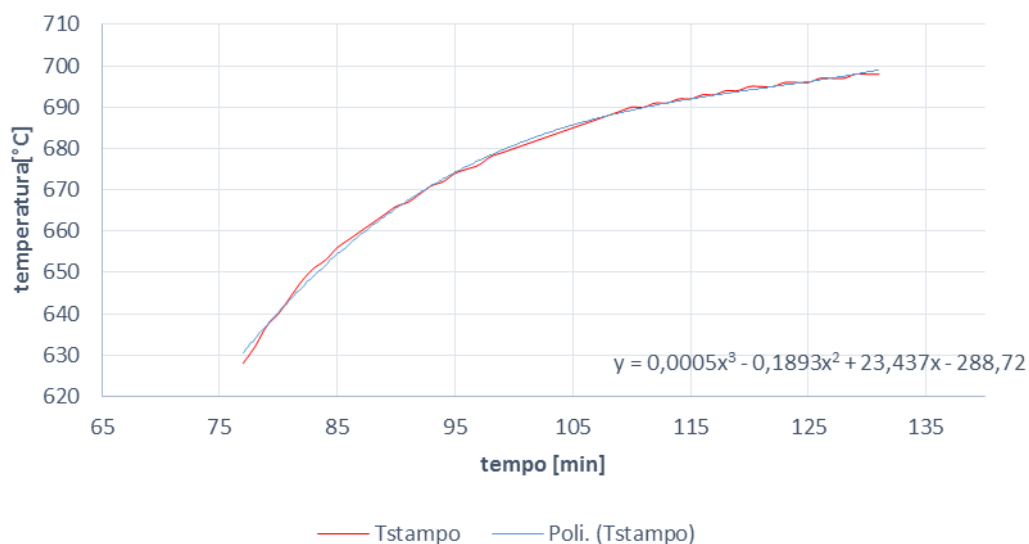


Figura 2.21 - Zoom del grafico di Figura 2.19 quando la temperatura del forno diventa costante, e linea di tendenza con andamento cubico e sua equazione

In tal senso si appura che se si imposta fin dall'inizio la temperatura di regime del forno pari a quella di schiumatura, a causa del suddetto andamento cubico, occorrerebbe più tempo a raggiungerla.

Né è pensabile di portare lo stampo a una temperatura maggiore di quella di schiumatura, poiché nella discesa l'andamento della T_{stampo} è approssimabile a una cubica (Figura 2.22) e quindi occorrerebbero 99 minuti per raggiungere la temperatura di schiumatura, che, per i motivi esposti precedentemente, sarebbe un tempo eccessivo.

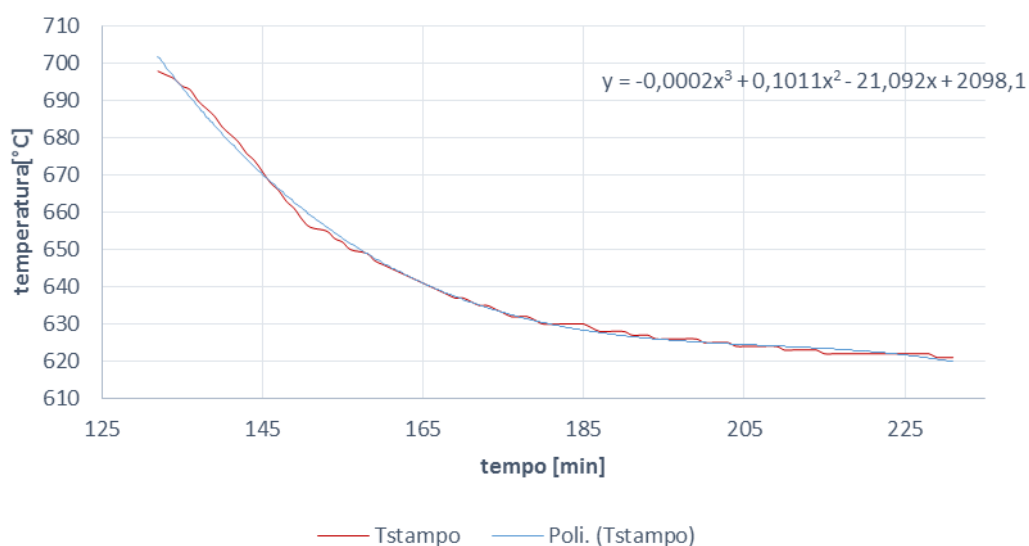


Figura 2.22 - Zoom del grafico di Figura 2.19 quando la temperatura del forno passa da 700°C a 620°C, e linea di tendenza con andamento cubico e sua equazione

Per le problematiche esposte, legate alla grande inerzia termica dello stampo, si è deciso di impostare la temperatura del forno a $695 \div 700$ °C per la prima rampa di salita, e di farla durare per un minuto, dopo il quale si passa alla nuova temperatura di regime, pari a quella di schiumatura, di $620 \div 630$ °C.

Per realizzare il raffreddamento dello stampo è da notare che il forno utilizzato non è dotato di un programma per la realizzazione di una rampa di discesa, quindi la temperatura all'interno del forno si è caratterizzato termicamente lo stampo in funzione del tempo.

Ciò permette di stabilire come impostare il forno in modo che lo stampo raggiunga la temperatura di schiumatura nel minor tempo possibile, compatibilmente con l'inerzia termica di quest'ultimo.

2.3.2 Prove di schiumatura

Prima di iniziare la prova bisogna stabilire la quantità di precursore da inserire all'interno dello stampo, prima di chiuderlo e inserirlo nel forno.

Conoscendo il volume della cavità cilindrica interna dello stampo: 502,400 cm³, stabiliremo quanti grammi di precursore inserire in base alla densità teorica che vogliamo realizzare, ossia quella densità che avrebbe la schiuma se durante la schiumatura non ne fuoriuscisse un'aliquota dallo stampo.

Ad esempio se si vuole realizzare una densità teorica di 0,47g/cm³ dobbiamo inserire 236g di precursore, secondo la formula:

$$m [g] = V[cm]^3 * \rho_t[\frac{g}{cm^3}]$$

Eq. 2.1

Dove V è il volume della cavità cilindrica, ossia il volume del provino finale.

Si realizza la prima prova di schiumatura, per la quale:

- Si è inserito un precursore di 237 g, in modo da ottenere una densità teorica di circa 0,47g/cm³;
- Si è impostata la temperatura di regime del forno a 700°C per la durata di un minuto, per poi passare a 620°C per un tempo più lungo.

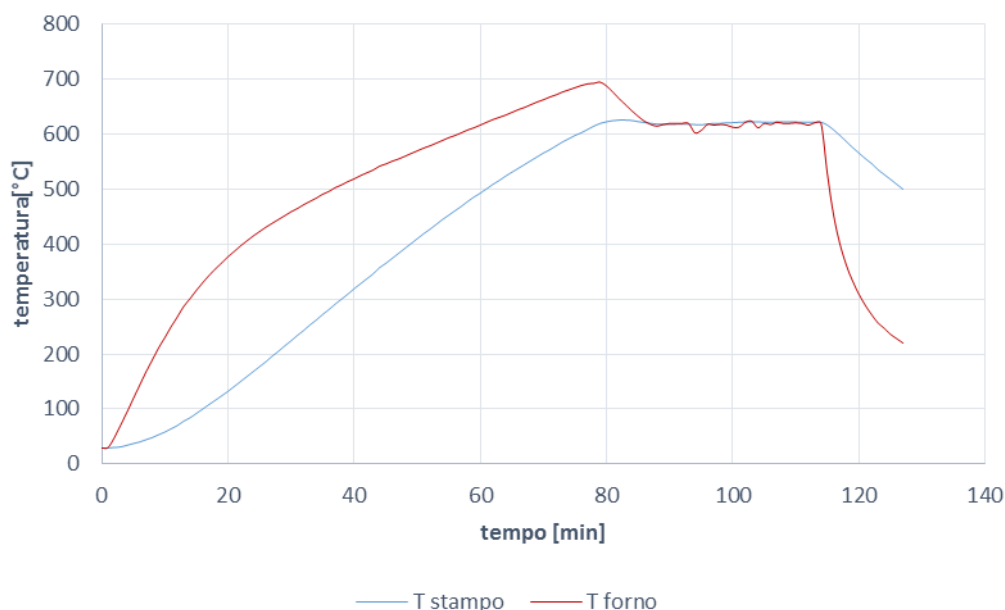


Figura 2.23 - Andamento delle temperature nella 1° prova sperimentale

Dalla prova si ottengono gli andamenti delle temperature riportati in Figura 2.23, i quali confermano che impostando il forno in accordo con quanto stabilito precedentemente, sia lo stampo che il precursore riescono a raggiungere la temperatura di schiumatura nel minor tempo possibile, in quanto si osserva che l'andamento della temperatura dello stampo è composta da un tratto lineare seguito da un tratto costante (che corrisponde già alla temperatura di schiumatura), anziché uno lineare seguito da un andamento cubico.

Definito come raggiungere la temperatura di schiumatura nel minor tempo possibile, compatibilmente con l'inerzia termica dello stampo, si analizzano:

- Tempo di schiumatura, ossia per quanto tempo restare a temperatura costante;
- Curva di raffreddamento della schiuma.
- In pratica il tempo di schiumatura non è prestabilito. La schiumatura si definisce ultimata quando si osserva fuoriuscire schiuma dai 2 forellini,

fatti a tale scopo, al centro di ciascuna delle 2 basi della cavità cilindrica, presenti uno per ognuna delle due piastre.

Per osservare ciò si apre brevemente il forno per controllare se è avvenuta la fuoriuscita di schiuma dai forellini. Nel grafico precedente era possibile osservare che il forno subisce cali di temperatura di alcuni gradi centigradi durante le brevi aperture del forno, mentre, grazie alla sua inerzia termica, ciò non accade per lo stampo.

In realtà in questa circostanza, siccome si temeva che tali forellini fossero inadeguati, ed anche resi inefficaci dalle prove a vuoto precedentemente compiute, si è completata la schiumatura dopo 35 minuti nonostante non fosse fuoriuscito materiale.

Si è passati, quindi, alla fase di raffreddamento in aria calma, semplicemente aprendo la porta del forno. Osservando la curva di raffreddamento di Figura 2.24, è possibile osservare che si raggiunge la temperatura di solidificazione della schiuma eutettica dopo 4 minuti, con un gradiente termico di circa $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$.

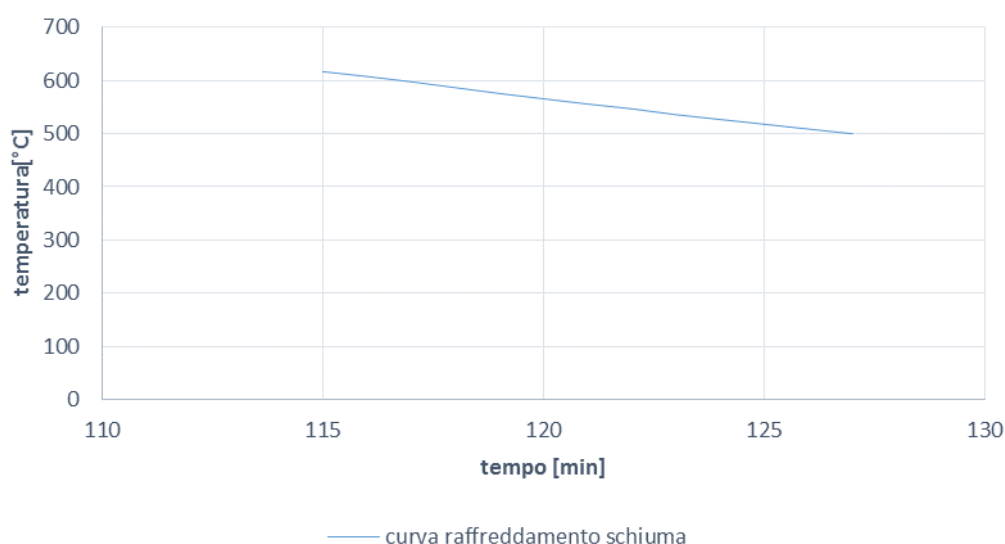


Figura 2.24 - Curva di raffreddamento cui è soggetta la schiuma nella prima prova.

Nell'aprire lo stampo si è visto che la schiuma non ha riempito neanche metà della cavità cilindrica.



Figura 2.25 – Vista laterale del provino ottenuto dalla prima prova



Figura 2.26 – Vista frontale del provino ottenuto dalla prima prova

Si è dunque pensato che il problema fosse stato il ridotto tempo di schiumatura. Per questa ragione è stata eseguita una successiva prova, nella quale:

- Sono stati inseriti 240g di precursore per ottenere una densità teorica della schiuma di circa $0,47\text{g/cm}^3$;
- È stata impostata la temperatura di regime del forno a 700°C , che una volta raggiunta sarebbe dovuta restare costante per 1 minuto, per poi passare alla nuova temperatura di regime di 630°C .

Dalla prova si è ottenuto il grafico delle temperature riportato in Figura 2.27:

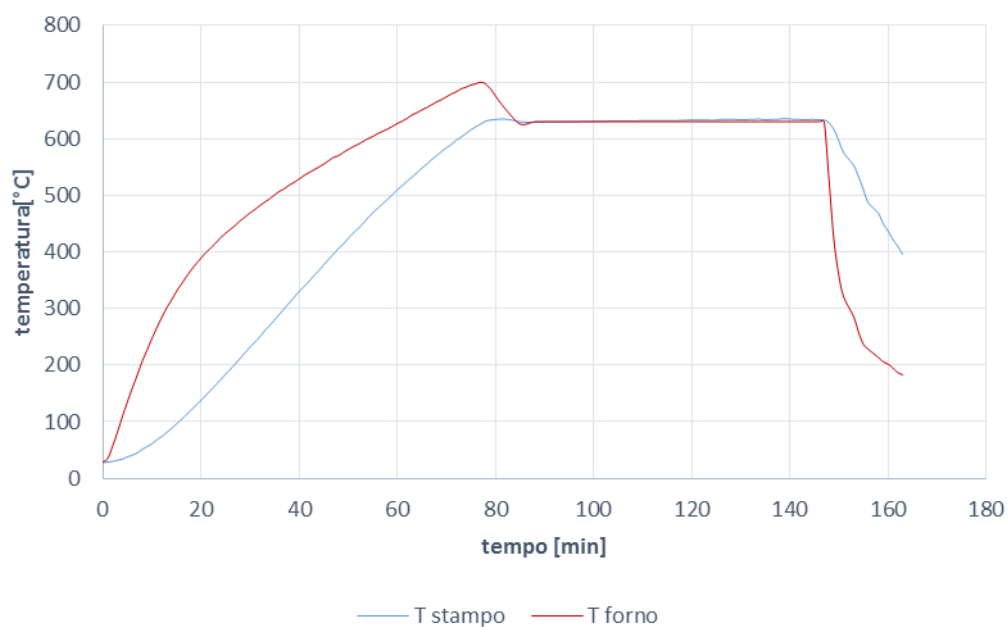


Figura 2.27 - Andamento delle temperatura in funzione del tempo ottenuto nella 2° prova sperimentale

Per caratterizzare i parametri di schiumatura, si analizza la Figura 2.28:

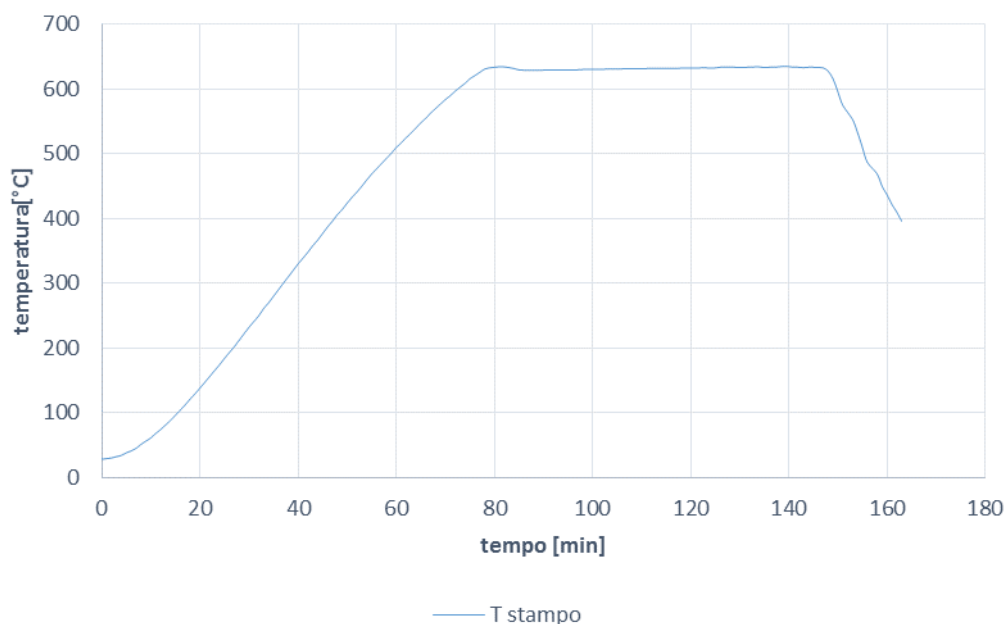


Figura 2.28 - Andamento della temperatura dello stampo nella 2° prova sperimentale

Dal grafico di Figura 2.28 si osserva che il tempo di schiumatura è stato di 70 minuti, dopo i quali si è aperta la porta del forno per consentire il raffreddamento e inoltre si è colpito lo stampo con un getto di aria compressa.

Dal grafico riportato in Figura 2.29 osserviamo che il gradiente di temperatura è stato, in media, $15,5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, raggiungendo la temperatura di solidus dopo 3 minuti e i 400°C dopo 14 minuti.

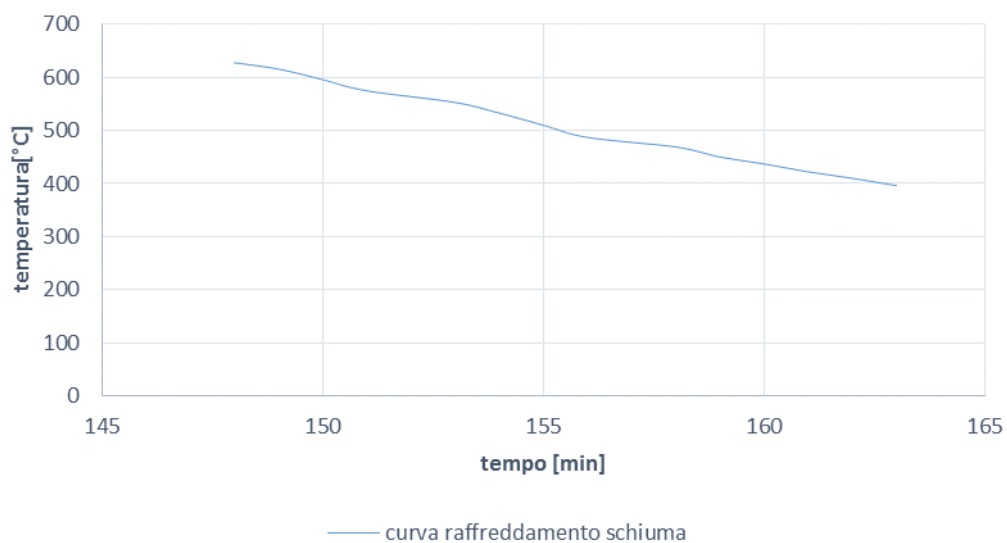


Figura 2.29 - Curva di raffreddamento cui è soggetta la schiuma nella seconda prova

Anche in questo caso la schiuma non era fuoriuscita dai forellini. Nell'aprire lo stampo si è palesata l'insoddisfaccenza della prova, come è evidente nelle Figura 2.30-2.31.



Figura 2.30 - Provino ottenuto dalla seconda prova ancora nello stampo, dal quale si evince che la schiuma ha riempito solo la metà della cavità cilindrica



Figura 2.31 - Provino ottenuto dalla seconda prova

Questa volta, si era sicuri che il problema non fosse dovuto alla brevità del tempo di schiumatura.

Nell'osservare la morfologia del provino ottenuto, si sono potute osservare:

- Zone in cui sono presenti conche, con le pareti spigolose, le quali lasciano immaginare che la schiuma si sia prima formata, ma poi le pareti dei pori abbiano ceduto (Figura 2.32 - 2.33);
- Alcune strisce nere, che davano l'impressione di un'eccessiva ossidazione di quelle zone (Figura 2.34 - 2.35).



Figura 2.32 - Zoom della conca a uno dei due estremi del provino



Figura 2.33 - Zoom della conca centrale del provino



Figura 2.34 - Zoom sulle strisce nere presenti sul provino



Figura 2.35 - Zoom sulle strisce nere presenti nella parte centrale del provino

Si è dunque pensato che il motivo di questi esiti negativi fosse il crearsi di una sacca d'aria nella parte superiore della cavità cilindrica. Raggiunta la temperatura di 400°C in alcuni punti del precursore è iniziata la reazione di dissociazione dell'idruro di titanio. L'idrogeno gassoso che si è scisso dal titanio non è libero né di espandere, né di fuoriuscire perché a quella temperatura il



precursore è ancora solido, quindi si formano pori di dimensioni quasi puntuali, nei quali il gas esercita un'elevata pressione. Raggiunta la temperatura alla quale il precursore diviene semiliquido, le zone quasi puntuali di alta pressione, hanno la possibilità di espandere, diventando porosità. Il materiale, avendo una certa viscosità, non permette la dispersione di gran parte dell'idrogeno gassoso. Inizia così la fase di espansione del precursore, grazie alla continua formazione di bolle. Tale fase è detta di schiumatura. All'espansione della schiuma corrisponde l'espulsione dell'aria dai 2 forellini praticati sulle piastrine dello stampo, in modo da lasciare spazio alla schiuma in espansione. Quando la schiuma è espansa fino ad occludere i forellini, l'aria ancora contenuta nella cavità non può continuare a fuoriuscire. Da questo punto in poi, essa inizia a esercitare sulla schiuma una distribuzione di pressioni, che si oppone all'avanzare della schiuma. Contemporaneamente nella schiuma si formano altre bolle, per la dissociazione dell'idruro di titanio, che spingono quelle preesistenti e quelle nuove che si trovano più in alto, verso il "muro" d'aria. Soggette a compressione sempre crescente le pareti dei pori collassano, e la schiuma si "affloschia" su se stessa. Sezionando il provino (Figura 2.36 e Figura 2.37), notiamo che non sono presenti porosità omogenee in dimensioni e distribuzione spaziale all'interno del materiale, ma solo 2-3 pori di dimensione degna di nota, ed altri insignificanti e per lo più il materiale è continuo.



Figura 2.36 - Il provino è stato tagliato circa al centro della conca presente all'estremità del provino

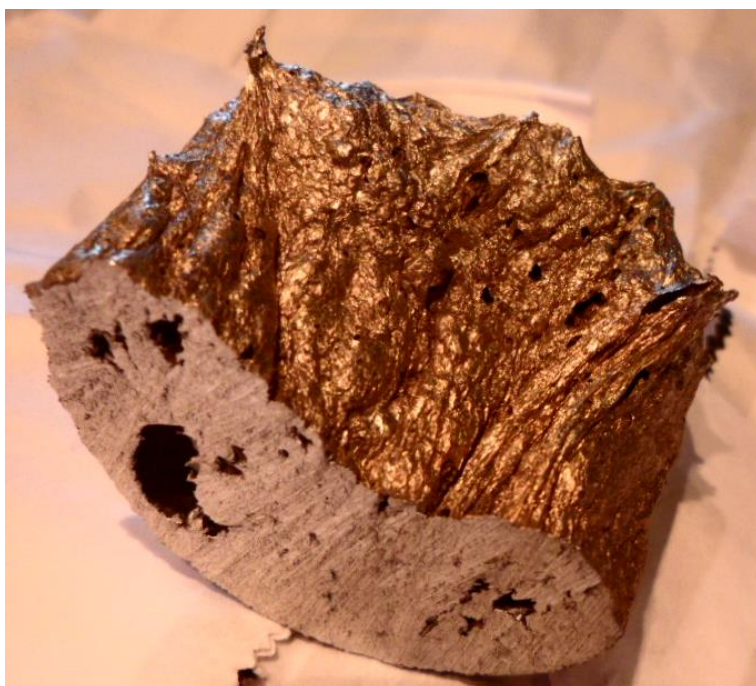


Figura 2.37 - Sezione del provino tagliato

Per far fronte a questo problema progettuale dello stampo, sono stati effettuati, con centro nella parte più alta delle 2 circonferenze di base della cavità cilindrica, 2 fori da 4 millimetri, in modo che il gas possa uscire durante l'intero processo di schiumatura (Figura 2.38).



Figura 2.38 - È riquadrato in rosso il foro di diametro 4mm

Si è quindi effettuata un'ulteriore prova utilizzando lo stampo modificato:

- Inserendo 323g di precursore per ottenere una densità teorica della schiuma di circa $0,64\text{g/cm}^3$;
- Impostando il forno a 695°C e poi a 620°C , secondo le modalità già descritte.

Il grafico che si ottiene è quello di Figura 2.39.

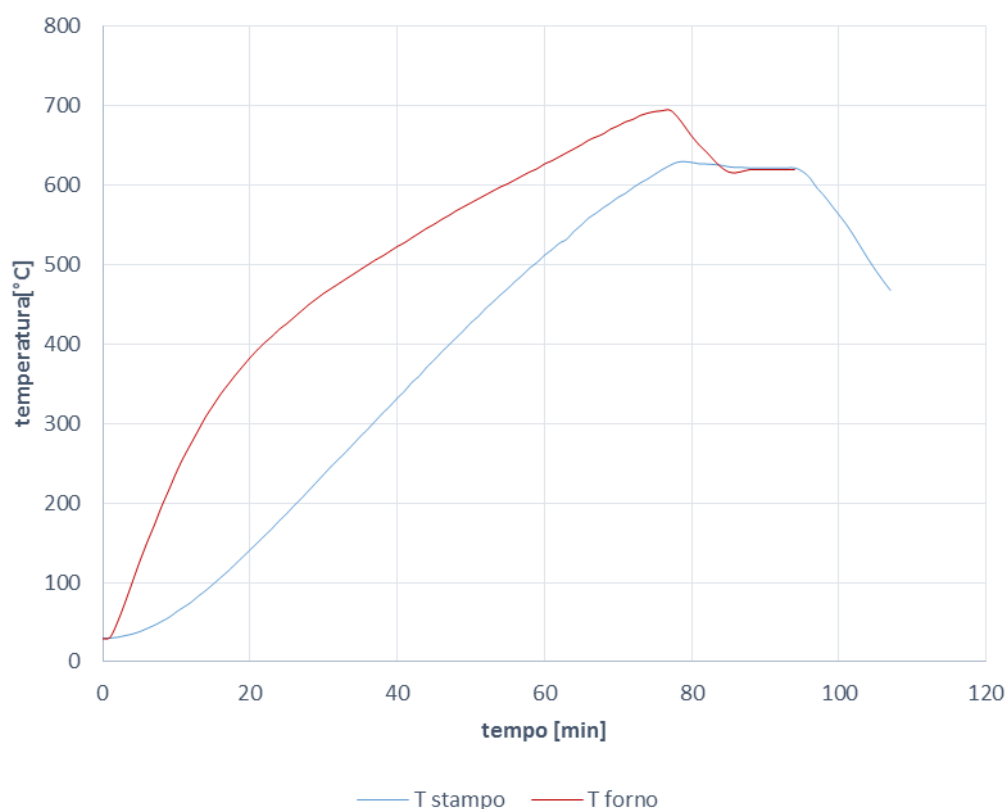


Figura 2.39 - Andamento delle temperature nella 3° prova sperimentale

Aprendo il forno dopo 18minuti per controllare se fosse avvenuta la schiumatura, si è constatato che il processo era già iniziato in quanto si è trovata della schiuma depositata sul piano d'appoggio del forno (Figura 2.40).



Figura 2.40 - Schiuma fuoriuscita dallo stampo durante la 3° prova sperimentale

A prova effettuata bisogna quantificare la massa del provino e tramite questa calcolare a mezzo della formula utilizzata per la densità teorica, la densità reale del provino.

Il provino ottenuto (Figura 2.41) ha una massa di 273g e ciò vuol dire che la schiuma avrà una densità reale pari a 0.54g/cm^3 .

Tale densità differisce da quella teorica a causa dell'aliquota di materiale fuoriuscita dallo stampo in fase di schiumatura.



Figura 2.41 - Schiuma metallica ottenuta nella 3° prova sperimentale

Questa volta si è riusciti a riempire l'intera cavità cilindrica e ad ottenere provino cilindrico in schiuma metallica.

Questa volta il raffreddamento è stato prima ad aria compressa, e successivamente tramite acqua.

2.4 Ripetibilità delle prove di schiumatura e ottimizzazione dei parametri

Per verificare se le prove si ripetano uguali a se stesse, e quindi caratterizzare, in maniera definita, la tecnologia utilizzata, sono state effettuate altri 3 provini in schiuma metallica.

Nelle Figura 2.42 – 2.43 – 2.44 sono rappresentati i 3 provini ottenuti.



Figura 2.42 - Primo provino della serie



Figura 2.43 - Secondo provino della serie



Figura 2.44 - Terzo provino della serie

Per ottenere i 3 provini, sono stati inseriti, rispettivamente, 321g per i primi due, e 317g per il terzo.

Inoltre il forno è stato impostato per il primo provino: 695°C, temperatura di regime da raggiungere nel minor tempo possibile, e da mantenere costante per 1 minuto, per poi passare a 620°C; per il secondo e il terzo l'unica differenza è che la prima temperatura di regime: 695°C, non è stata mantenuta costante per 1 minuto, ma per 0 minuti. Ciò significa che appena la termocoppia del forno avesse rilevato il raggiungimento di tale temperatura, la nuova temperatura di regime sarebbe diventata quella di 620°C.



Pesando i provini e la rispettiva schiuma fuoriuscita, sono state rilevate le seguenti masse:

- 1° e 2° provino = 260g, per una densità reale di circa $0,51 \text{ g/cm}^3$ anziché $0,63 \text{ g/cm}^3$ a causa alla fuoriuscita di un'aliquota di schiuma;
- 3° provino = 256g, per una densità reale di circa $0,51 \text{ g/cm}^3$ anziché $0,63 \text{ g/cm}^3$ a causa alla fuoriuscita di un'aliquota di schiuma.

Il raffreddamento delle tre schiume è avvenuto in aria ferma fino a circa $400 \div 300^\circ\text{C}$, con una velocità di $0,3^\circ\text{C}/1,5\text{s}$, in quanto il termometro rileva la temperatura in base a questo intervallo temporale, o equivalentemente di $0,2^\circ\text{C}/\text{s}$. Dopo di che è stato possibile estrarlo dal forno e raffreddarlo tramite acqua fornita da un tubo.



Capitolo 3 La Caratterizzazione meccanica

3.1 Introduzione

Nel seguente capitolo si enuncia la caratterizzazione meccanica dei diversi cilindri in schiuma di alluminio, presentanti diverse frazioni volumetriche di aria. Ciò ha consentito la caratterizzazione a compressione per diverse densità relative delle schiume stesse. Le prove di compressione, così come ipotizzato, hanno mostrato un andamento a compressione caratteristico dei materiali cellulari elasto-plastici. Tale analisi empirica costituisce la base di confronto per validare il modello numerico ottenuto a partire da DIGIMAT. Infine è stata anche tracciata la linea di tendenza, di natura esponenziale, della variazione del carico di rottura al variare della densità apparente, e quindi relativa, del provino.

3.2 Materiali e metodi

Per effettuare le prove meccaniche è stata utilizzata la macchina universale per prove meccaniche MTS ALLIANCE RT/50, la quale consente di eseguire diverse tipologie di prove tra cui: trazione, compressione, flessione a tre punti, indentazione.

Tale macchina, in figura seguente, è composta da un telaio con piano d'appoggio del pezzo e da una traversa mobile movimentata da motori elettrici passo-passo ad alta precisione. I dati misurati dalla macchina sono

successivamente elaborati da un computer mediante l'uso di un software apposito. La RT/50 è in grado di muovere il suo carrello per oltre un metro (1105mm) con una velocità minima di 0.001 mm/min ed una velocità massima di 1016 mm/min. La risoluzione di posizionamento è di 0.062 micrometri. La cella di carico usata è in grado di sopportare carichi fino a 50 kN. Il software utilizzato è il TestWorks 4: esso permette di associare, ad un'elevata velocità d'uso, la massima flessibilità.



Figura 3.1 - Macchina universale per prove meccaniche MTS ALLIANCE RT/50,

I provini sono stati realizzati con una lunghezza L di 60 mm in modo da rispettare il fattore geometrico di $L/D=1.5$ [2]. I provini sono stati tagliati mediante una punta di diamante per minimizzare il danneggiamento dei bordi delle celle. La Figura 3.2 mostra due campioni testati a compressione, di lunghezza pari a 60 mm.



Figura 3.2 - Provini soggetti a prove di compressione

La prova di compressione è stata condotta imponendo una velocità di abbassamento della traversa mobile di 4 mm/min secondo norma ASTM C 365 (Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores). Nella presente norma si enuncia non solo la modalità di esecuzione della prova di compressione, ma la metodologia per caratterizzare il core di un materiale composito sandwich. La scelta è mirata considerando gli sviluppi futuri della presente attività di ricerca, infatti la schiuma metallica si presta ad essere usata come riempitivo di un materiale composito sandwich. Infatti i compositi a base di schiuma d'alluminio sono materiali molto interessanti per l'applicazione nel settore dei trasporti. In particolare, i sandwich realizzati tramite legame metallurgico con due pelli in alluminio e il core in schiuma d'alluminio (AFS), si candidano all'impiego in componenti strutturali grazie alla loro resistenza a fuoco, alla elevata riciclabilità associate ad un rapporto resistenza-peso ed a proprietà di assorbimento di energia estremamente elevate.

3.3 Analisi dei risultati

Le prove di compressione, così come ipotizzato, hanno mostrato un andamento a compressione caratteristico dei materiali cellulari elasto-plastici [1]. Dopo un primo tratto elastico il materiale raggiunge la tensione di snervamento, ne segue un collasso plastico delle prime celle che causa una diminuzione della forza. Successivamente vi è un plateau piuttosto irregolare con dei picchi di forza causati dal collasso delle pareti delle celle. Infine, in corrispondenza di una deformazione pari a 0.25 – 0.35 circa, inizia la fase di densificazione e quindi una ripresa della caratteristica meccanica della schiuma. In Figura 3.3 – 3.5 è riportato un provino con una densità apparente di 0.36 g/cm³ durante la prova di compressione.



Figura 3.3 – Step I



Figura 3.4 – Step II



Figura 3.5 – Step III



Figura 3.6 – Step IV

Sono state condotte 4 prove di compressione a diverse densità apparenti. In Figura 3.7 vengono mostrati i risultati delle 4 prove sperimentali.

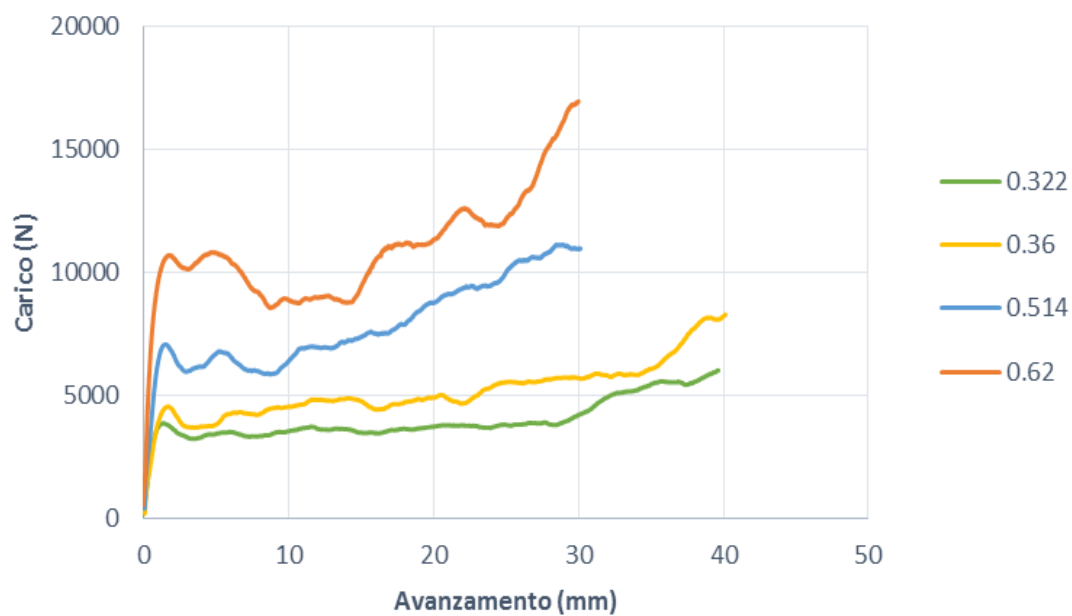


Figura 3.7 - Risultati delle prove sperimentali a compressione

Dall'analisi delle diverse curve, mostrate in figura sopra, si evince che esse mostrano un tratto *lineare elastico* a basse tensioni seguito da una lunga fase di *collasso costante (plateau)*, troncata da un regime di *densificazione* in cui la tensione aumenta precipitosamente. Un'attenta osservazione [1], mediante l'utilizzo di microscopi ottici e a scansione, fa pensare che il meccanismo di deformazione è associato ad ogni regime parallelo così come per le strutture a nido d'ape. L'elasticità lineare viene infatti controllata dalla *parete della cella inflessa* e, se le celle sono chiuse, dall'allungamento della faccia della cella; il modulo di Young, E^* , è la pendenza iniziale della curva tensione-deformazione. Quando il carico è di compressione, il *plateau* è associato con il *collasso* delle celle - dall'instabilità elastica nelle schiume elastomeriche (per esempio la gomma); dalla formazione di *cerniere plastiche* in una schiuma che cede (come i metalli ad esempio); e da una rottura fragile nelle schiume fragili (come le ceramiche o quelle di vetro). Quando le celle sono collassate quasi completamente, le pareti opposte si toccano e un'ulteriore deformazione comprime il solido stesso, dando nella regione finale un rapido incremento della tensione. In tutte i test effettuati, durante la compressione, tutti i provini presentano un limitato tratto di comportamento elastico prima di presentare il fenomeno di collasso plastico. Tale comportamento valida l'esecuzione della prova sperimentale. Questo particolare comportamento reologico del materiale prevede, come si nota nella figura sopra, la formazione e la propagazione nel materiale di zone localizzate in cui si assiste al collasso della struttura cellulare. Come conseguenza di questo fenomeno [1] è possibile ottenere elevate deformazioni in campo plastico, mantenendo praticamente costante la tensione nel materiale. Aumentando la densità relativa della schiuma aumenta il modulo di Young, si alza il valore di tensione di plateau e si



riduce la deformazione, al che comincia la densificazione. Inoltre, all'aumentare della densità apparente, aumenta la forza massima di compressione.

In virtù dell'implementazione in Digimat, per la realizzazione del modello geometrico, sono state calcolate le percentuali volumetriche di aria per ogni densità apparente. La Tabella 3.1 mostra la corrispondenza tra densità apparente e la percentuale volumetrica di vuoti per ogni provino analizzato.

Test di compressione				
N° Provino	#1	#2	#3	#4
Densità apparente [g/cm3]	$\rho^*_1 = 0,32$	$\rho^*_2 = 0,36$	$\rho^*_3 = 0,51$	$\rho^*_4 = 0,62$
Volume effettivo [mm3]	$V_1 = 8991,93$	$V_2 = 10053$	$V_3 = 14353$	$V_4 = 17313$
Frazione volumetrica	$F_{V1} = 0,88$	$F_{V2} = 0,86$	$F_{V3} = 0,81$	$F_{V4} = 0,77$
Densità relative	$\rho_1 = 0,12$	$\rho_2 = 0,13$	$\rho_3 = 0,19$	$\rho_4 = 0,23$
Massa del provino [g]	24.3	27.14	38.75	46.75

Tabella 3.1 – Parametri caratteristici dei provini utilizzati.

In cui, per il generico provino i , i diversi parametri sono stati calcolati nel seguente modo:

$$V_i = V_s \rho^*_i / \rho_{Al}$$

$$F_{Vi} = V_s - V_i / V_s$$

$$\rho_i = \rho^*_i / \rho_{Al}$$

Dove: V_s è il volume interno dello stampo, ρ^*_i la densità apparente del generico provino i , ρ_{Al} la densità dell'Alluminio e V_i e ρ_i rispettivamente il volume e la densità relativa del generico provino i .

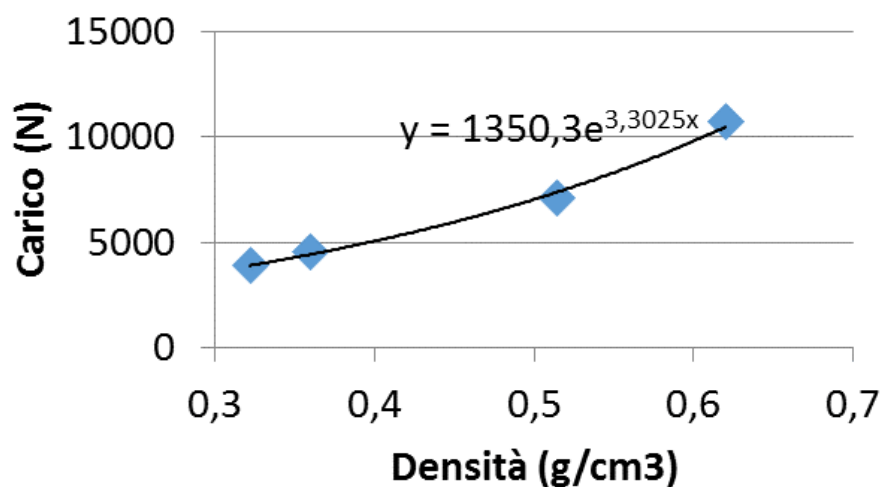


Figura 3.8 - Carichi retti in funzione della densità per la prova di compressione di schiume metalliche.

In Figura 3.8, invece, si mostrano i carichi di rottura dei singoli provini. Nello specifico è stata anche tracciata la linea di tendenza, di natura esponenziale, della variazione del carico di rottura al variare della densità apparente, e quindi relativa, del provino. Dalla figura si evidenzia un marcato incremento del carico limite all'aumentare della densità. Il motivo è sicuramente riscontrabile in una percentuale di massa maggiore nel provino, al crescere della densità relativa, e quindi in una rigidità a compressione sicuramente più elevata



Capitolo 4 Costruzione del modello geometrico RVE (Representative Volume Element)

4.1 Analisi della morfologia della schiuma di alluminio a celle chiuse

A monte dell'implementazione all'interno del software DIGIMAT, per la generazione della geometria, è stata analizzata una porzione di un pannello di schiuma di Alluminio con una densità pari a 0.55 g/cm^3 . Il provino in analisi ha una dimensione longitudinale di 320 mm, uno spessore di 30 mm ed una larghezza di 30 mm. Il provino è stato successivamente suddiviso graficamente in 20 sezioni, 10 per ogni lato ("A" e "B"), mediante l'ausilio di un marker. Ogni sezione è stata fotografata ed è stata successivamente importata all'interno di un software grafico, per misurare l'area ed il diametro di tutte le porosità. Per ogni sezione è stata calcolata la media e la varianza dei diametri delle porosità. Nella figura seguente sono riportate alcune delle sezioni analizzate nei rispettivi lati A e B.

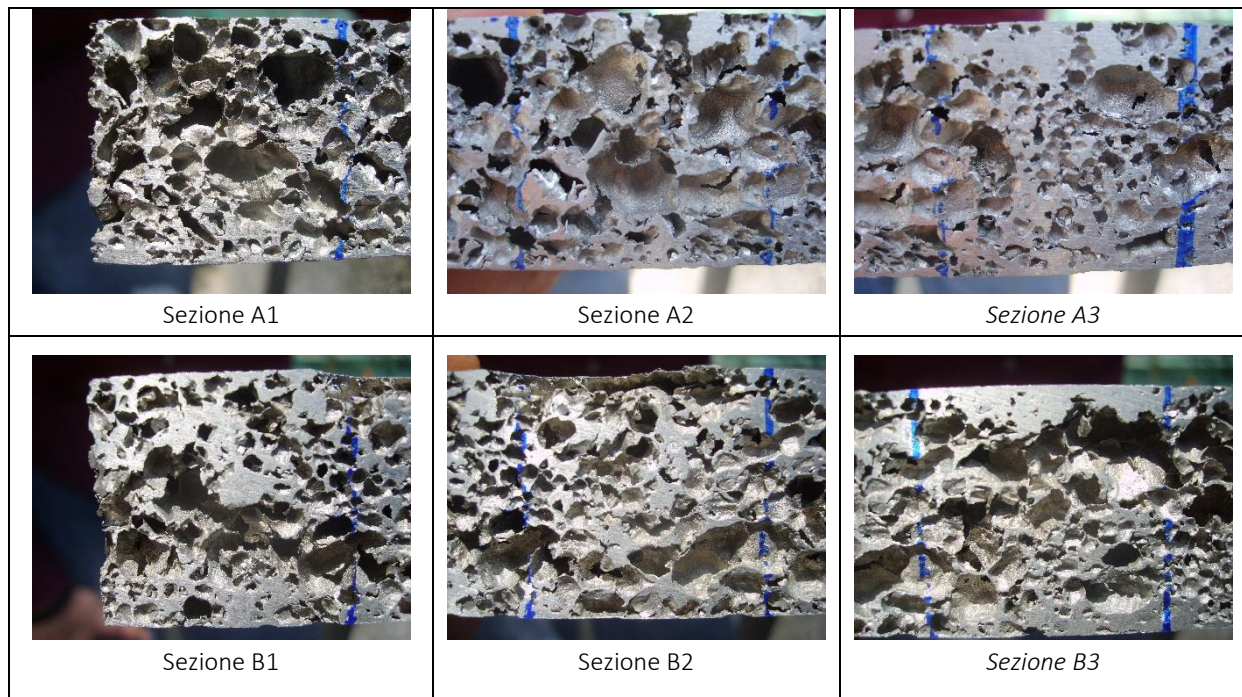


Figura 4.1 - esempio di sezioni analizzate

In Tabella 4.1 viene riportato il valore di media e varianza dei diametri delle porosità, per ogni sezione, espresso in mm. Successivamente è stato calcolato il valore globale di media e di varianza dei diametri delle porosità, questo valore è stato implementato all'interno del software DIGIMAT.



Grandezze caratteristiche delle porosità contenute all'interno di una schiuma metallica			
Sezione caratteristica	Valore medio dei diametri delle porosità [mm]	Varianza	Valore medio dello spessore delle pareti della cella elementare [mm]
Sezione A1	2.83	4.49	0,32
Sezione A2	3.16	5.67	0,37
Sezione A3	2.12	4.35	0,39
Sezione A4	3.54	5.23	0,56
Sezione A5	3.23	4.89	0,62
Sezione A6	2.57	4.76	0,46
Sezione A7	2.35	4.13	0,42
Sezione A8	2.86	5.16	0,59
Sezione A9	3.45	5.42	0,52
Sezione A10	3.39	5.03	0,60
Sezione B1	2.74	4.62	0,49
Sezione B2	2.95	5.32	0,53
Sezione B3	2.64	4.79	0,57
Sezione B4	2.93	4.84	0,43
Sezione B5	3.18	5.35	0,40
Sezione B6	3.09	4.64	0,65
Sezione B7	2.59	5.12	0,44
Sezione B8	3.13	5.26	0,69
Sezione B9	3.41	5.37	0,63
Sezione B10	3.15	4.95	0,75
Modello Digimat	2.81	4.75	0,52

Tabella 4.1 - Grandezze caratteristiche delle porosità contenute all'interno di una schiuma metallica.

4.2 Creazione del modello geometrico

4.2.1 Generazione di un RVE (Representative Volume Element) con Digimat

Una volta studiata la morfologia della schiuma sono stati implementati i parametri nel software. Si fa presente che delle 4 frazioni volumetriche sottoposte alla prova di compressione, è stata presa in considerazione solo la prima ossia $V_f=0,77$. Per tale motivo nel seguito si parlerà solo di questa prova e il confronto numerico sperimentale verrà condotto fra 5 provini aventi un $V_f=0,77$ e la prima prova sperimentale.

Digimat [42] possiede diversi tools che permettono di modellare materiali compositi e non, con geometrie molto complesse. Nel caso specifico è stato utilizzato il modulo FE.

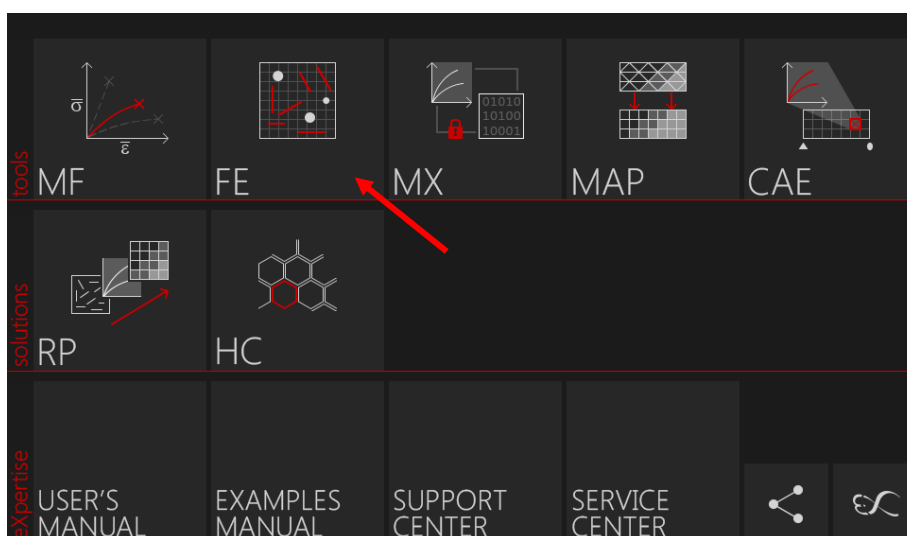


Figura 4.2 - Schermata iniziale di Digimat

Digimat-FE è il modulo agli elementi finiti di Digimat basato sul criterio di omogeneizzazione. Digimat-FE viene utilizzato per generare un RVE (Representative Volume Element) realistico di una larga varietà di microstrutture dei materiali (plastica, gomma, metalli, grafite, etc.). Il modello agli elementi finiti risultante può essere risolto utilizzando ogni codice FEA.

Digmat-FE possiede una vasta gamma di capacità che consentono una generazione di morfologie microstrutturali, estremamente complesse di facile utilizzo, che possono essere risolte accuratamente con un onere computazionale ragionevole.

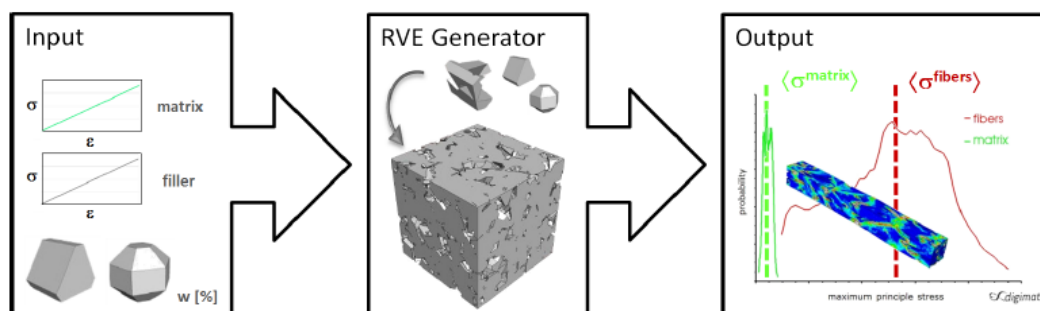


Figura 4.3 - Digimat FE- flusso di lavoro

Nel caso in analisi in particolare si vuole:

- Generare un modello geometrico stocasticamente in Digimat, inserendo i dati morfologici precedentemente valutati.
- Importare il modello di output di Digimat e preprocessarlo in Ls-Prepost.
- Risolvere il codice FE con Ls-Dyna (codice non lineare ad elementi finiti incrementale Lagrangiano e Euleriano).
- Confrontare i risultati dell'analisi numerica con quelli dell'analisi sperimentale.

L'obiettivo perseguito è stato quello di realizzare un modello equivalente, costruendo un RVE con dei "void" (vuoti), in cui questi ultimi, rappresentano le porosità di una schiuma. Operativamente infatti, dalla schermata principale di Digimat è possibile settare i parametri generali di un'analisi che prevede una generazione geometrica.

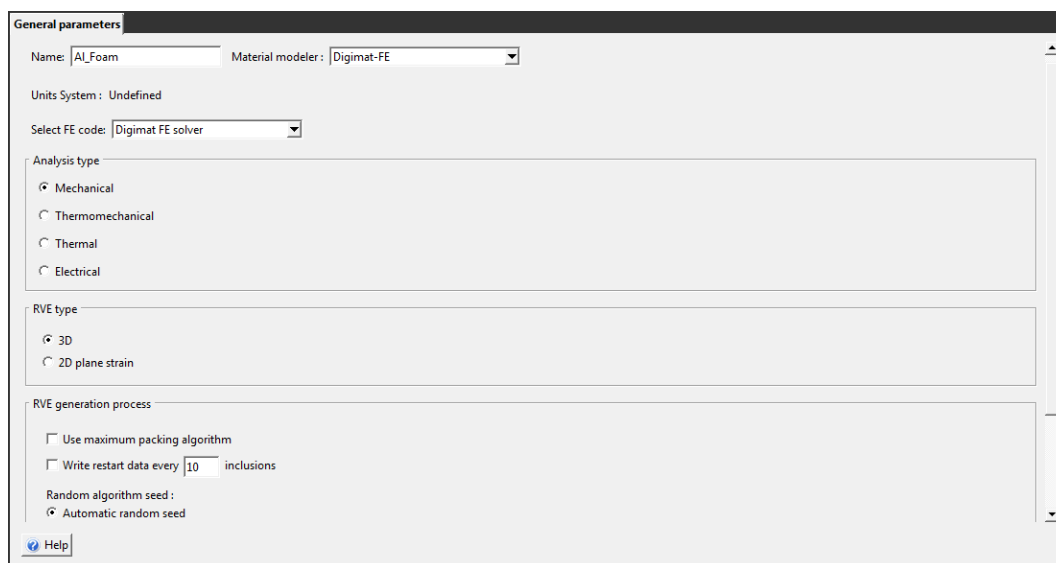


Figura 4.4 - Parametri Generali nell'impostazione di un'analisi

Come si vede dalla Figura 4.4 è stata impostata un'analisi di tipo meccanico e la generazione di un RVE tridimensionale. Sulla sinistra si trova l'albero dinamico di Digimat (Figura 4.5). Sulla voce “*materials*” è possibile aggiungere un nuovo materiale. In questo caso come si vede in Figura 4.4, il materiale inserito è la lega di Alluminio utilizzata per realizzare la schiuma ossia AlSi₁₀.

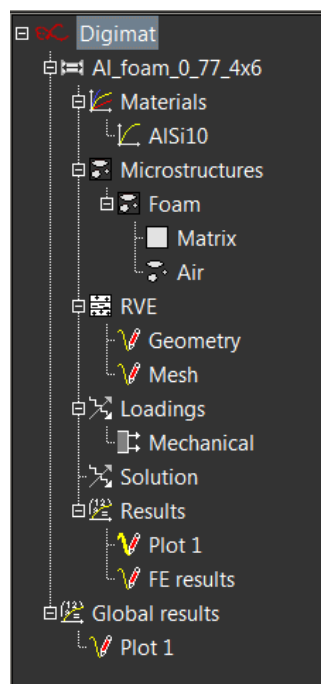


Figura 4.5 - Albero dinamico

In particolare nella figura che segue vengono mostrate caratteristiche meccaniche inserite. Alla voce “*Model*” è possibile inserire:

- la denominazione al materiale, nel caso specifico: “AlSi10”.
- Il tipo di legge costitutiva che si vuole assegnare al materiale, nel caso specifico: “Elastoplastico”.
- Il criterio di plasticità che si vuole utilizzare, nel caso in analisi: “J2”
- Il modello isotropico di durezza, nel caso si è utilizzata una legge esponenziale.

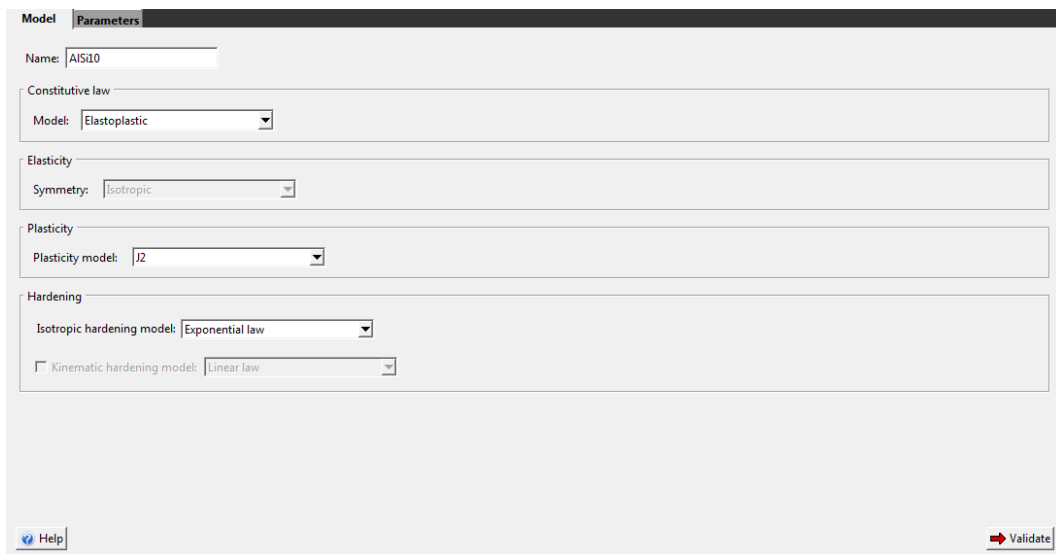


Figura 4.6 - Modello del materiale

Alla voce “*parameters*” è possibile inserire i dati del materiale scelto:

- Alla voce “*Density*” è possibile inserire la densità del materiale, nel caso specifico: 2.7×10^{-9} [T/mm³].
- Alle voci “*Elastic parameters*” sono stati inseriti i parametri elastici di una lega di Alluminio.
- Alla voce “*Yield stress*” è stato inserito il valore della tensione di snervamento della lega in analisi: ossia 235 MPa.
- Alla voce “*Hardening modulus*” e “*Hardening exponent*” sono stati inseriti i parametri dell’alluminio [42].

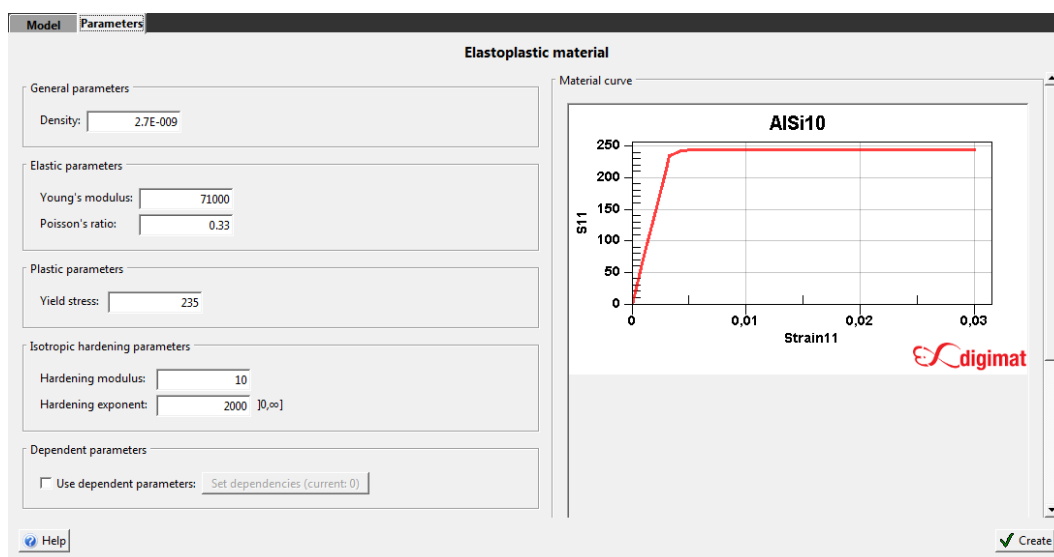


Figura 4.7 - Parametri del materiale

Successivamente si è passati alla creazione della microstruttura. Chiaramente, come già illustrato in precedenza, la microstruttura della schiuma è una struttura bifasica in cui si alternano le porosità, costituite sostanzialmente da gas e le pareti delle celle formate dalla lega di Alluminio. Per cui sono state create due fasi. Per prima cosa è stata creata la matrice metallica per cui alla voce “Phase type” è stato spuntata la casella “Matrix”, e alla voce “Phase material” è stata assegnata la lega di Alluminio precedentemente creata come mostrato in Figura 4.8.



Figura 4.8 – Matrice Metallica

Nel caso della creazione delle porosità è stato scelto di non assegnare nessun materiale a queste ultime, poiché il comportamento del materiale gassoso è difficilmente implementabile all'interno di un software FEM. Inoltre per prove a compressione quasi statiche il contributo offerto dalla fase gassosa, in termini di resistenza a compressione è pressoché trascurabile. Per tale motivo è stato scelto di implementare nel modellatore geometrico la fase gassosa come “vacanze”. Per cui nella finestra “Type” alla voce “Phase Type” è stata spuntata la casella “Void”, in questo modo si omette l’assegnazione del materiale, come mostrato in Figura 4.9.

Type **Parameters** **Advanced parameters**

Microstructure name:

Phase name:

Phase type

☐ Matrix

☐ Inclusion

☒ Void

☐ Continuous fiber

☐ Yarn

Surface treatment

Interface behavior:

Interface property:

☐ Inter-phase:

[Help](#) [Validate](#)

Figura 4.9 - Fase gassosa "Type"

Type **Parameters** **Advanced parameters**

Phase fraction

☒ Volume fraction: [0,1]

☐ Mass fraction: [0,1]

Phase definition

Define phase by: ☐ Number of inclusions:

☒ Inclusion size and aspect ratio

☐ Inclusion size and diameter

Shape parameter

Inclusion shape:

Inclusion CAD file: [Browse](#)

Aspect ratio: [0,∞]

Diameter:

Size

☐ Fixed:

☒ Distribution:

Mean: Variance:

☐ Allow size reduction

Max. number of size reductions:

Size reduction factor:

Orientation

☐ Fixed: Theta: Phi:

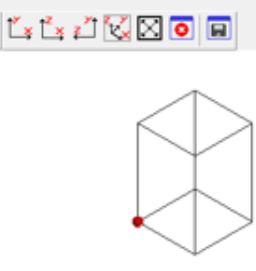
☒ Random:

☐ Tensor: $a_{[1,1]}$ $a_{[1,2]}$ $a_{[1,3]}$

$a_{[2,2]}$ $a_{[2,3]}$

$a_{[3,3]}$

Preview



[Refresh inclusion visualization](#)

[Inclusion Geometric Properties](#)

Minimum number of inclusions that will be generated: 795

RVE size: 20.000000 * 20.000000 * 30.000000

[Help](#) [Create](#)

Figura 4.10 - Fase gassosa "Parameters"

Nella finestra “*Parameters*” nella sezione “*Phase fraction*” alla voce “*Volume fraction*” è stata inserita la frazione volumetrica della prima simulazione numerica che si vuole realizzare ossia pari alla frazione volumetrica della prima prova sperimentale ossia 0,77. Nella sezione “*Phase Definition*” alla voce “*Define phase by*” è stata spuntata la casella “*Inclusion size and aspect ratio*”, in questo modo è stato scelto di definire la fase mediante l’assegnazione della taglia delle inclusioni e dell’aspect ratio (rapporto L/D). Nella finestra “*Shape parameters*” è stata scelta la forma “*Ellipsoid*” che con un aspect ratio pari ad 1 che è pari ad una sfera come mostrato in Figura 4.10. Tale approssimazione è stata fatta per semplificare la morfologia delle celle ed ottenere una geometria più semplice possibile che meglio approssimi il modello fisico. Nella finestra “*Size*” sono stati implementati i parametri di variabilità della forma delle celle elementari in particolare è stata scelta una distribuzione di tipo normale dove alla voci “*Mean*” e “*Variance*” sono stati inseriti rispettivamente i valori di media e varianza misurati precedentemente. Per quanto concerne l’orientazione, è stato scelto di disporre le porosità in maniera casuale nello spazio per cui è stata scelta un’orientazione di tipo “*Random 3D*”.

Per quanto riguarda l’RVE è stato settato in modo da avere le stesse dimensioni del cilindretto utilizzato per le prove sperimentali. Cliccando sull’albero alla voce RVE si possono andare a modificare i parametri relativi al volumetto rappresentativo che si vuole realizzare.

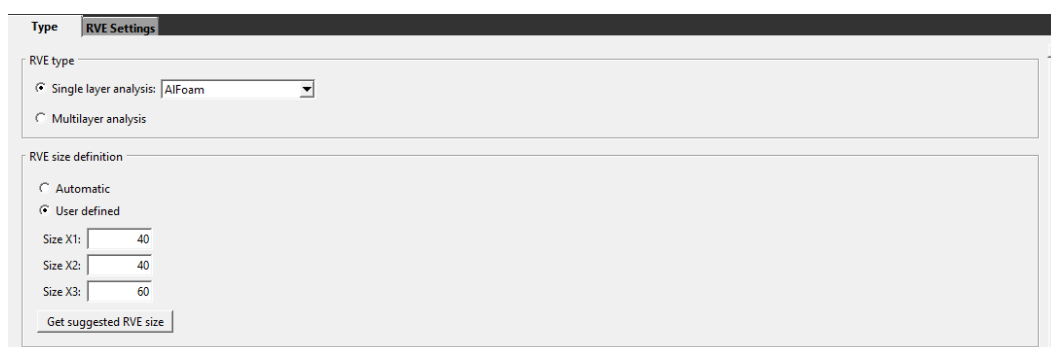


Figura 4.11 - RVE type

Nella finestra “*RVE size definition*” è possibile, spuntando la casella “*User defined*”, è possibile settare la misura delle 3 dimensioni che si vogliono assegnare al parallelepipedo. Nel caso specifico alla voce “*Size X1*” e “*Size X2*” sono state assegnate le grandezze di base del provino, per cui 40x40 mm. Alla voce “*Size X3*” è stata assegnata la misura longitudinale del provino ossia 60. È bene specificare che, con il tool FE di Digimat è possibile realizzare solo un RVE parallelepipedo per cui, la geometria finale è stata successivamente importata in un Software CAD, ed è stata modificata al fine di ottenere una forma cilindrica. Tale passaggio verrà meglio illustrato nel seguito.

Nella finestra RVE settings si è spuntata la casella “*Allow interpenetration of inclusion*” (vedi Figura 4.12) in modo da consentire la penetrazione delle inclusioni, così come accade nel processo reale.

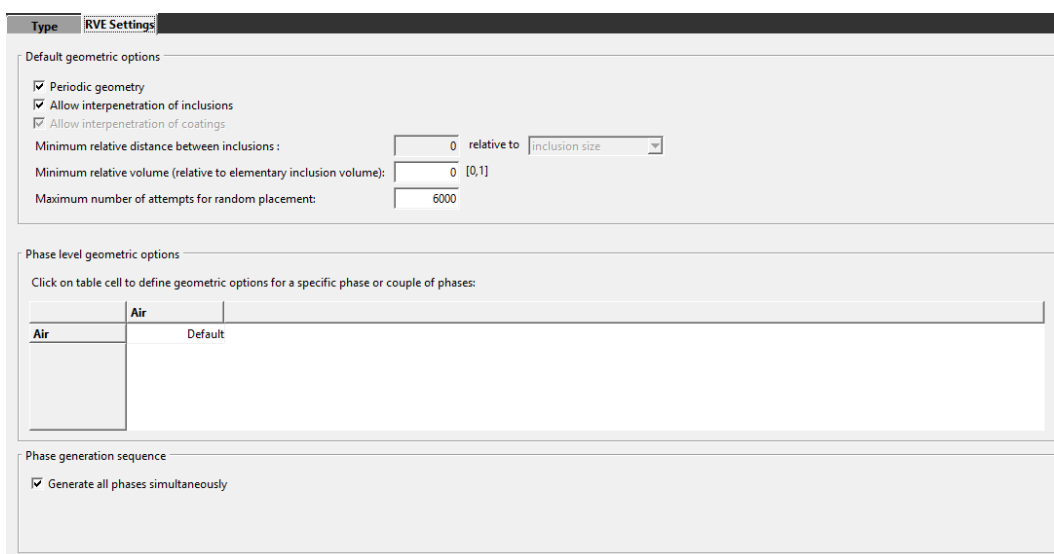


Figura 4.12 - RVE Settings.

Infine si lancia il calcolo della generazione geometrica. Tale operazione è stata eseguita per 5 volte in modo da creare 5 differenti modelli. Nonostante tali modelli siano stati generati con gli stessi valori dei parametri sopraelencati, essi risultano essere marcatamente differenti in virtù della generazione casuale del software. Chiaramente tale operazione è stata effettuata per valutare come varia lo scostamento percentuale dei risultati numerici al variare del modello matematico generato da Digimat, validando in questo modo anche l'efficacia del software.

Considerando la potenza di calcolo del Processore (AMD A4-5000 APU with Radeon™ HD Graphics 1.50 GHz), l'onere computazionale del software, in merito al processo di generazione della geometria, dura all'incirca 45 minuti. Il modello generato da Digimat si presenta come in Figura 4.13. Le sfere in rosso chiaramente rappresentano le porosità presenti all'interno dell'RVE.

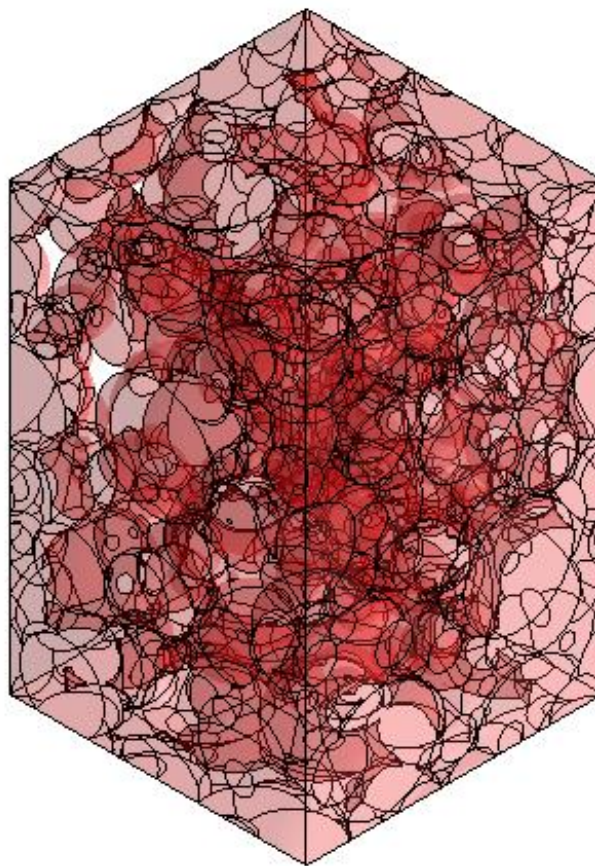


Figura 4.13 - RVE generato da Digimat

Il software Digimat dopo un'analisi di tipo geometrica fornisce in output 4 files. Una volta terminate tali operazioni l'RVE è stato salvato come file avente un'estensione .STP (step file) ed è stato importato in CATIA V5. In tale fase si sono rimosse le difettosità superficiali presenti e sono state effettuate alcune operazioni geometriche per ottenere un cilindro analogo a quello utilizzato per le prove sperimentali.

4.2.2 Modifiche del modello geometrico con Catia V5.

4.2.2.1 Il modello tridimensionale

Avendo realizzato un RVE parallelepipedo, le cui dimensioni sono 40x40x60, è necessario estrarre un cilindro avente un diametro di 40 mm ed una dimensione

assiale di 60 mm. Dopo un'operazione di taglio e dopo aver rimosso il materiale in eccesso il modello si presenta come in Figura 4.14.

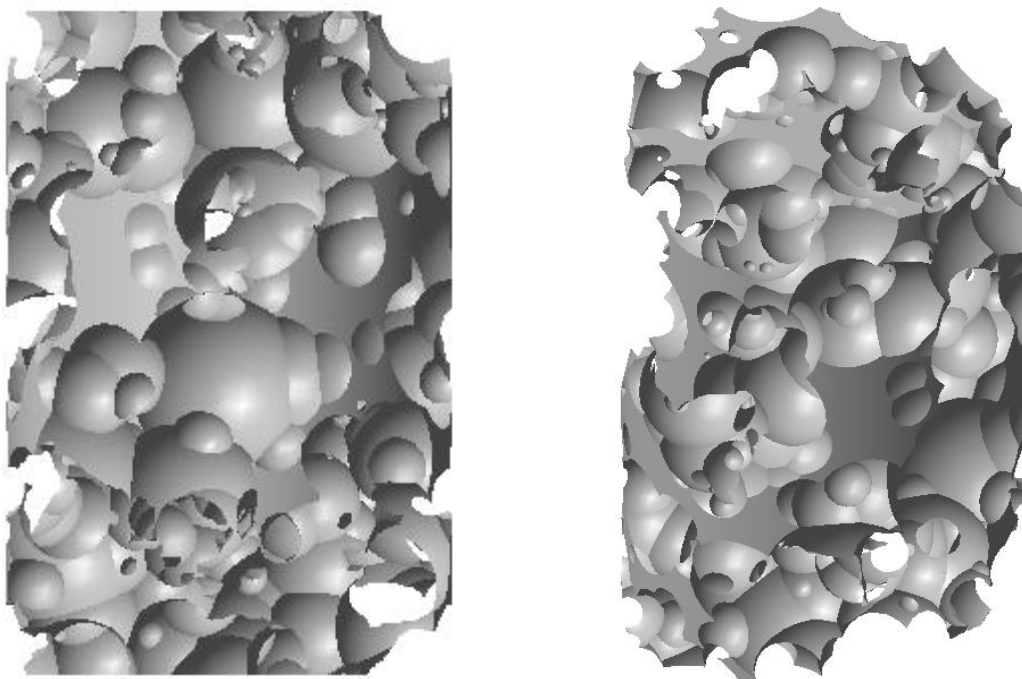


Figura 4.14 – Modello CAD 3D generato da Digimat

Tale modello è stato poi importato in Ls-Prepost ed è stato discretizzato con degli elementi tridimensionali, in particolare data la geometria complessa sono stati utilizzati i Tetra4, i quali sono elementi del primo ordine della libreria di Ls-Dyna. Eseguendo il calcolo agli elementi finiti si è visto che tale configurazione risultava troppo onerosa dal punto di vista computazionale, convergendo a soluzione dopo numerose ore di calcolo (48 ore circa). Chiaramente, un tempo di calcolo così elevato perde di utilità, quindi in virtù di tale osservazione, si è scelto di realizzare un modello equivalente, basato su una discretizzazione superficiale, alleggerendo così il file CAD e di conseguenza l'analisi FE.

4.2.2.2 *Il modello per superfici*

Al fine di generare un modello FE equivalente è stato necessario richiedere un output al software Digimat, diverso da quello richiesto nella precedente analisi. I file output CAD che vengono forniti al termine dell'analisi geometrica di Digimat sono 4:

1. Void, ossia la mappature delle vacanze presenti nella matrice;
2. Void uncut, ossia il file parasolid delle sole vacanze;
3. Matrix, ossia la matrice privata dei vuoti;
4. Matrix uncut, ossia la sola matrice piena.

Nel caso precedente si era presa in considerazione la terza tipologia di output, ossia il file CAD che di fatto rappresenta l'RVE della schiuma. In tale fase, volendo procedere con la realizzazione di un modello per superfici si è preso in considerazione il secondo file ossia quello contenente tutte le vacanze generate dal software. Il file si presenta come in Figura 4.15:

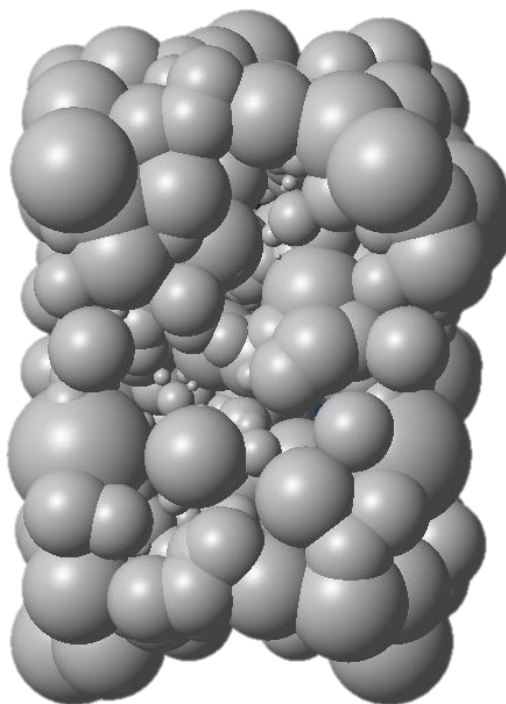


Figura 4.15 – Voids

Questo file di partenza presenta tutte le porosità sferiche generate da Digimat, le quali non sono interconnesse tra loro e sono tutte piene. L'obiettivo è quello di realizzare un provino cilindrico formato da celle vuote tutte interconnesse tra di loro in modo da simulare il comportamento di una schiuma. Di seguito si riportano i passaggi che sono stati eseguiti per realizzare questo modello.

1. Unione tra tutte le porosità piene, mediante operazioni geometriche booleane.
2. Taglio ed estrazione di un provino cilindrico avente un diametro di 40mm ed una dimensione assiale di 60 mm.
3. Proiezione delle superfici esterne.
4. Rimozione del solido interno, mediante operazioni geometriche booleane.

Una volta terminate tali operazioni il modello CAD si presenta come in Figura 4.16.

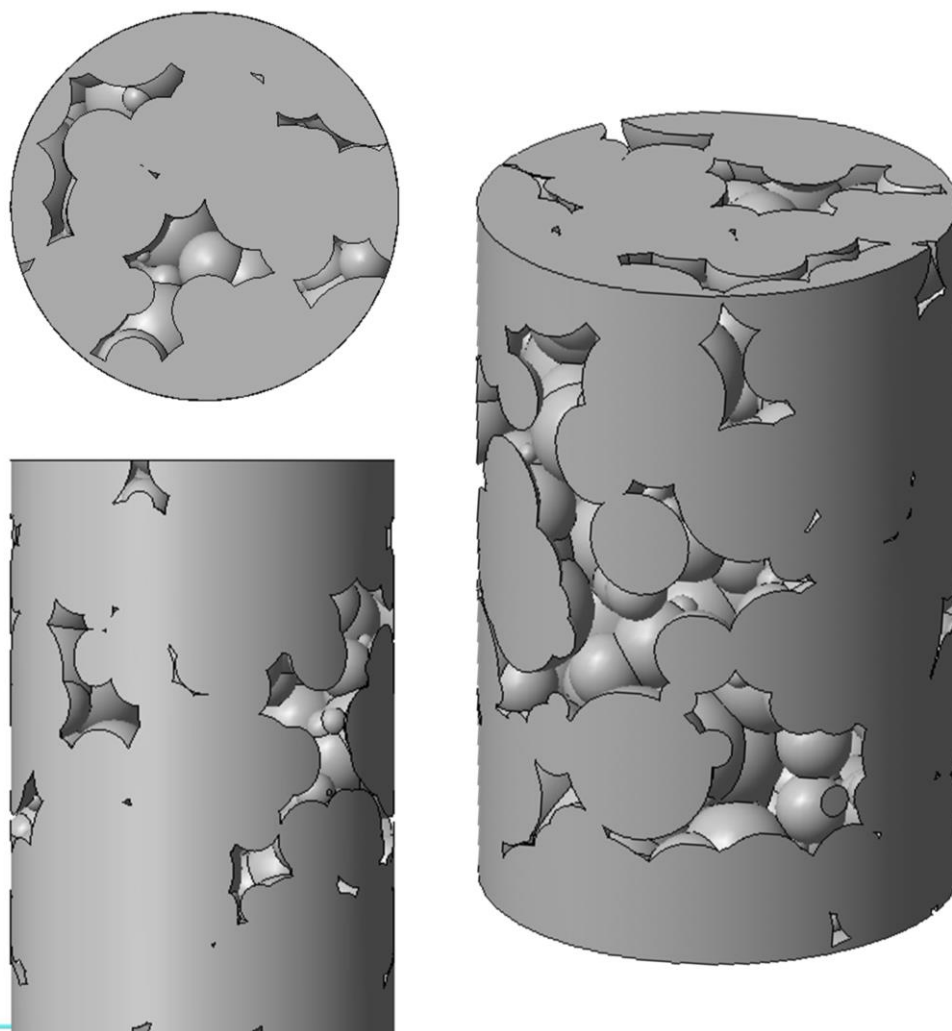


Figura 4.16 - Modello virtuale morfologicamente equivalente

Tali operazioni sono state effettuate per tutti e 5 i provini realizzati. Il modello CAD così realizzato è stato importato nel Software agli elementi finiti Ls-Prepost ed è stato preprocessato.



Capitolo 5 Realizzazione del modello FE

5.1 Introduzione

Il metodo degli Elementi Finiti permette di risolvere il problema della determinazione dello stato di sforzo e deformazione in elementi in condizioni di carico per le quali non è reperibile o ricavabile la soluzione analitica. In questo metodo si discretizza il continuo, che ha infiniti gradi di libertà, con un insieme di elementi di dimensioni finite, tra loro interconnessi in punti predefiniti (nodi). È quindi possibile ridurre il problema statico in un sistema di equazioni algebriche con un numero finito di incognite (gli spostamenti nodali).

Nel metodo degli elementi finiti si assume una funzione di spostamento all'interno del singolo elemento, definendo cioè le componenti di spostamento del generico punto come una funzione, ipotizzata nota, degli spostamenti dei nodi: il problema, con tale assunzione, passa dal dominio continuo al dominio discreto visto che le nuove incognite sono gli spostamenti nodali. Una volta noti gli spostamenti nodali è immediato il passaggio alle deformazioni e, mediante la matrice di legame sforzi-deformazioni, si passa successivamente al tensore degli sforzi.

Prodotto dalla Livermore Software Technology Corporation, l'**LS-DYNA** è un codice ad elementi finiti dedicato all'analisi dinamica non lineare di strutture. Come per ogni codice ad elementi finiti, la seduta di lavoro tipo si articola nelle tre fasi:

✓ **Preprocesso;**

- ✓ *Analisi numerica* (soluzione);
- ✓ *Postprocesso*.

É noto come il maggior dispendio di energie sia ascrivibile alla prima delle suddette tre fasi, a sua volta smembrabile nelle seguenti sotto fasi:

- Acquisizione della geometria; in tale frangente il preprocessore impiegato (*Ls-Prepost 3.1*) non ha mostrato alcun tipo di problemi di comunicazione, potendo sia accettare senza problemi dei files .igs provenienti da altri ambienti, sia generare dal suo interno la geometria di cui si necessita;
- Modellazione agli elementi finiti: la struttura viene discretizzata, cioè divisa in nodi, a loro volta collegati da elementi il cui comportamento è noto e tale da garantire sia la continuità degli spostamenti (nel senso che gli spostamenti dei punti giacenti su un lato comune a più elementi deve essere funzione solo dei nodi che delimitano il suddetto lato, e non del particolare elemento considerato), sia la possibilità di avere spostamenti di corpo rigido;
- Definizione dei carichi e delle condizioni cinematiche: devono essere cioè definiti i carichi agenti sulla struttura, i suoi vincoli e, ove necessario, in che modo la struttura entrerà in contatto con corpi esterni o con se stessa, nel caso in cui i carichi siano tali da provocarne il collasso. Sulle complesse tematiche dei contatti e delle penetrazioni si avrà comunque modo di tornare nel proseguo del lavoro;
- Definizione delle grandezze desiderate in output: stante la pluralità di files di output attivabili, è necessario prestare attenzione sia alle grandezze cui si è realmente interessati e dunque ai particolari file che le contengono, sia ai nodi dei quali interessa conoscere le suddette grandezze, sia all'intervallo di tempo intercorrente tra due successive

operazioni di immagazzinamento dati nei files; non è infatti infrequente, riempire gli output di dati inutili che finiscono con il mascherare quelli di reale interesse, o addirittura produrre una tale quantità di output che porta all'aborto dell'analisi per l'esaurirsi dello spazio a disposizione;

- Controllo della validità del modello: si deve verificare che nel modello costruito siano assenti elementi eccessivamente deformati o con rapporto di forma troppo spinto, al pari delle compenetrazioni iniziali (alle quali, come si vedrà, l'LS-DYNA è molto "sensibile"), e deve inoltre accertarsi della connessione tra gli elementi costituenti il modello stesso. Per tutte queste funzioni l'LS-Prepost si rivela molto efficace e di facile utilizzo, racchiudendole tutte nell'apposito menu CHECK;
- Trasferimento del modello al solutore: i files prodotti dal LS-PREPOST (il cui formato è *.dyn*) possono, all'interno dello stesso modulo, essere tradotti nel formato *.k*.

Per quanto attiene invece la fase di analisi dei dati, ossia di postprocesso, questa è effettuabile sia per via strettamente numerica a partire dai files ASCII di output, sia per via grafica, attraverso i due moduli a tale fase destinati ossia il **POST-GL** (integrato nell'LS-Prepost), in grado di produrre anche degli utilissimi file *.avi* rappresentativi dell'andamento degli spostamenti nell'intervallo di tempo analizzato, di una qualunque caratteristica della sollecitazione della struttura ecc., sia attraverso il **GRAPH PROCESS** in grado di tradurre il contenuto dei files di output in utilissimi grafici.

L'analisi numerica della caratterizzazione meccanica dei provini in schiuma di alluminio, sottoposti a sforzo di compressione, ha seguito tutti i step enunciati precedentemente, ponendo particolare attenzione sulla modellazione FEM della geometria del provino, sulla caratterizzazione non del materiale (elasto-plastico non

lineare), e sulla tipologia di contatti con cui caratterizzare l'interazione dei piatti della traversa e del provino stesso.

5.2 Descrizione del file di input di LS-DYNA

Come detto, il file .k è il file ASCII utilizzato in input dal solutore dell'LS-DYNA. Nel file sono ben distinguibili due sezioni riguardanti ognuna degli aspetti ben distinti della costruzione del modello:

- l'area di controllo, nella quale si addensano i comandi per il settaggio di tutte le caratteristiche numeriche dell'analisi che si è in procinto di compiere, insieme con quelli che controllano i rapporti con i files di output;
- l'area di definizione geometrica del modello, nella quale si definiscono i nodi costituenti lo stesso, gli elementi che li connettono, i materiali di cui sono costituiti e, ove necessario, le equazioni di stato con le quali vengono trattati tali materiali, insieme con i carichi agenti, i vincoli e le interfacce di contatto.

All'interno di ognuna delle suddette aree i dati numerici sono immessi in "cards" rigidamente suddivise in 8 campi da 10 caratteri all'interno di ciascuno dei quali è possibile adottare il formato più conveniente per i numeri senza alcuna limitazione. La figura 6.1 cerca di chiarire la struttura del file ed il modo in cui al suo interno sono collegate le varie entità.

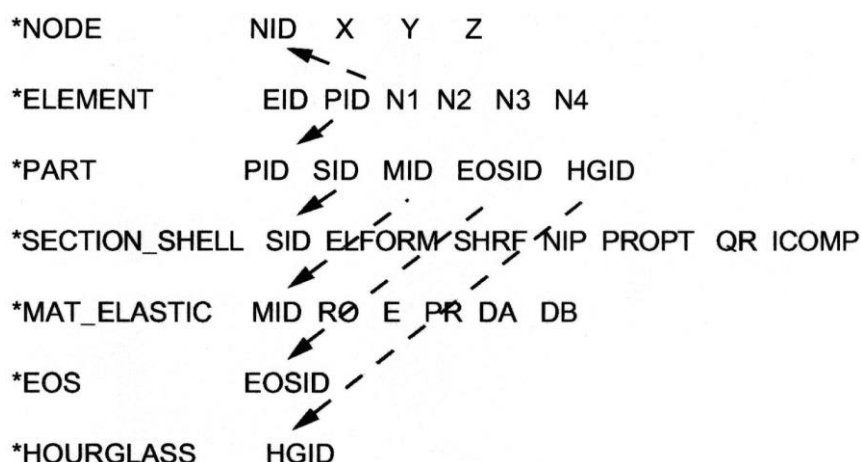


Figura 5.1: struttura del file .k

In essa le frecce indicano i collegamenti logici tra le varie keywords. Così nella keyword ***ELEMENT** sarà presente un “element identifier”, un identificatore della parte cui l’elemento appartiene, insieme con gli identificatori dei nodi delimitanti l’elemento stesso, a loro volta definiti nella sezione ***NODE**. I campi della keyword ***PART** contengono invece l’identificatore della parte, della sezione cui essa appartiene, del materiale di cui è costituita (che rimanda alla sezione ***MAT**), dell’equazione di stato con la quale il materiale è eventualmente modellato (che è specificata nella sezione ***EOSD**), e via procedendo in questa serie di “specificazioni concatenate tra loro” fino alla keyword ***END**, che chiude il file. Un’osservazione anche solo superficiale rende immediatamente chiara la necessità dell’utente di dover acquisire il più velocemente possibile la massima familiarità tanto con la divisione in campi del file, tanto con il significato del maggior numero possibile delle cards e dei loro campi, essendo questo l’unico modo per compensare la perdita del contatto fisico con il problema nella delicata fase del preprocesso.

5.3 Descrizione del moto e soluzione delle equazioni di equilibrio

La natura dei problemi alla cui soluzione è mirato l'LS-DYNA, fortemente non lineari e lontani dall'ipotesi di piccole deformazioni, pone l'utente davanti alla necessità di scegliere, prima di tutto, la formulazione del vettore degli spostamenti più adeguata al problema. Se infatti, come avviene nella maggior parte dei casi, un approccio lagrangiano conduce a risultati del tutto validi, non di rado ci si trova di fronte a distorsioni degli elementi talmente spinte da rendere necessario il ricorso ad una formulazione euleriana del problema.

Per quanto esposto si è ritenuto utile riassumere i due modi di descrivere il problema del moto di un corpo, preceduti da un piccolo, ma utile, glossario dei termini chiave usati nella trattazione.

- **Punto:** è una posizione fissa nello spazio;
- **Particella:** è una piccola porzione di un mezzo continuo;
- **Configurazione di una particella:** è l'insieme dei punti dello spazio occupati da una particella ad un dato istante;
- **Deformazione:** è il cambiamento di forma subito da un continuo, tra una configurazione iniziale, generalmente indicata come "indeformata", ed una finale;
- **Flusso:** indica il continuo stato di moto di un mezzo continuo.

5.3.1 Approccio lagrangiano ed euleriano al problema del moto di un corpo

Si consideri ora la generica particella P_0 di un continuo, individuata al tempo $t=0$ dalle coordinate X ed Y , relativamente ad un riferimento OXY . Al passare del tempo, le coordinate X ed Y varieranno secondo le leggi:

$$\begin{aligned}x &= x(X, Y, t) \\ y &= y(X, Y, t)\end{aligned}$$

Eq. 5.1

le quali, se note per ogni particella del continuo, rappresentano la legge di trasformazione del dominio $V_0(X, Y)$ nel dominio $V(x, y)$ parametrizzata in funzione del tempo t . Supponendo che la suddetta trasformazione sia ad un sol valore, le (5.1) devono anch'esse risultare funzioni di un sol valore, continue e differenziabili. Inoltre lo jacobiano della trasformazione:

$$|F| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x}{\partial X} & \frac{\partial x}{\partial Y} \\ \frac{\partial y}{\partial X} & \frac{\partial y}{\partial Y} \end{vmatrix} = \left| \frac{\partial \mathbf{x}_i}{\partial \mathbf{X}_j} \right|$$

Eq. 5.2

risulterà essere non singolare, ossia diverso da 0 in V_0 e $\forall t$. Con tali ipotesi, le (5.1) rappresentano la cosiddetta “descrizione lagrangiana materiale del moto di un corpo”. Le coordinate indipendenti X ed Y , descriventi la configurazione indeformata del corpo, sono dette anche “coordinate materiali”, mentre le coordinate dipendenti x ed y , descriventi la configurazione al generico istante t , sono anche note come “coordinate spaziali”. In tale formulazione la velocità e le accelerazioni sono definite come le derivate locali delle coordinate spaziali rispetto al tempo, vale a dire:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{u}} &= \dot{\mathbf{u}}(X, Y, t) = \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} \right)_{X, Y} & \dot{\mathbf{v}} &= \dot{\mathbf{v}}(X, Y, t) = \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right)_{X, Y} \\ \ddot{\mathbf{u}} &= \ddot{\mathbf{u}}(X, Y, t) = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \right)_{X, Y} & \ddot{\mathbf{v}} &= \ddot{\mathbf{v}}(X, Y, t) = \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} \right)_{X, Y}\end{aligned}$$

Eq. 5.3

mentre invece lo spostamento della particella è definito dal vettore:

$$\{\Delta\} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{x}(0) \\ \mathbf{y}(0) \end{bmatrix}$$

Eq. 5.4

Nella descrizione lagrangiana, dunque, ogni particella è definita dalle sue coordinate all'istante t generico. In altre parole, la formulazione lagrangiana consente di descrivere il cammino percorso da una generica particella dalla configurazione iniziale, utilizzando questa come riferimento.

Tuttavia tale descrizione può rivelarsi inadeguata. Specialmente nello studio del moto del fluido in un condotto, più che alla "storia" del moto di una particella, si è interessati a determinare il campo di velocità in una prefissata sezione, nonché la sua evoluzione temporale. Quanto detto equivale a considerare le coordinate x ed y , nonché il tempo t come variabili indipendenti, ossia ad adottare la cosiddetta "*formulazione euleriana*" o spaziale, nella quale il moto istantaneo del continuo è definito dal campo di velocità $\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}_i(x, y, t)$ rappresentativo della velocità della generica particella che, all'istante t , transita per la posizione (x, y) . Inoltre in tale formulazione, l'accelerazione istantanea si dimostra essere data da:

$$\ddot{u}_i = \frac{d\dot{u}_i(x, y, t)}{dt} = \left(\frac{\partial \dot{u}_i(x, y, t)}{\partial t} \right)_{x, y} + \dot{u}_j(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial \dot{u}_i(x, y, t)}{\partial x_j} \right)_t$$

Eq. 5.5

In questa espressione il primo termine rappresenta la derivata locale della velocità, mentre il secondo è invece noto come termine convettivo o di trasporto. In altri termini, con la (5.5) si è introdotta la cosiddetta *derivata sostanziale* che, di una generica grandezza P , misura la variazione del tempo, così come la vedrebbe un osservatore solidale alla particella di continuo che, all'istante considerato, transita per la posizione di coordinata (x, y) . In simboli:

$$\frac{DP}{Dt} = \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{x, y} + \dot{u}_j(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial x_j} \right)_t$$

Eq. 5.6

E' evidente che, sostituendo a P la velocità, si otterrebbe ancora la (5.5) mentre, volendo sostituire a P uno spostamento, la (5.6) restituisce la velocità istantanea partendo da:

$$\dot{u}_i(x, y, t) = \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} \right)_{x,y} + \dot{u}_j(x, y, t) \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)_t$$

Eq. 5.7

E' ora fondamentale, anche alla luce di quanto si sta per dire, notare come, considerando l'espressione che la derivata sostanziale assume nella descrizione lagrangiana degli spostamenti, questa coincida con la derivata locale, venendo infatti a mancare il termine convettivo o di trasporto.

A chiarimento delle differenze implicate dalle due descrizioni degli spostamenti, si consideri la figura 5.2, nella quale è illustrata la deformazione, avente luogo tra gli istanti 0 e t , di una trave incastrata. Tenuto conto del fatto che nel caso specifico il ruolo della particella è assunto dalla fibra, si evince come, adottando la formulazione lagrangiana, si segua il percorso della fibra dalla sua configurazione indeformata (al tempo 0), a quella deformata al tempo t ; mentre invece ricorrendo alla descrizione euleriana, determinata la configurazione di una fibra all'istante t , si possa risalire alla sua configurazione iniziale.

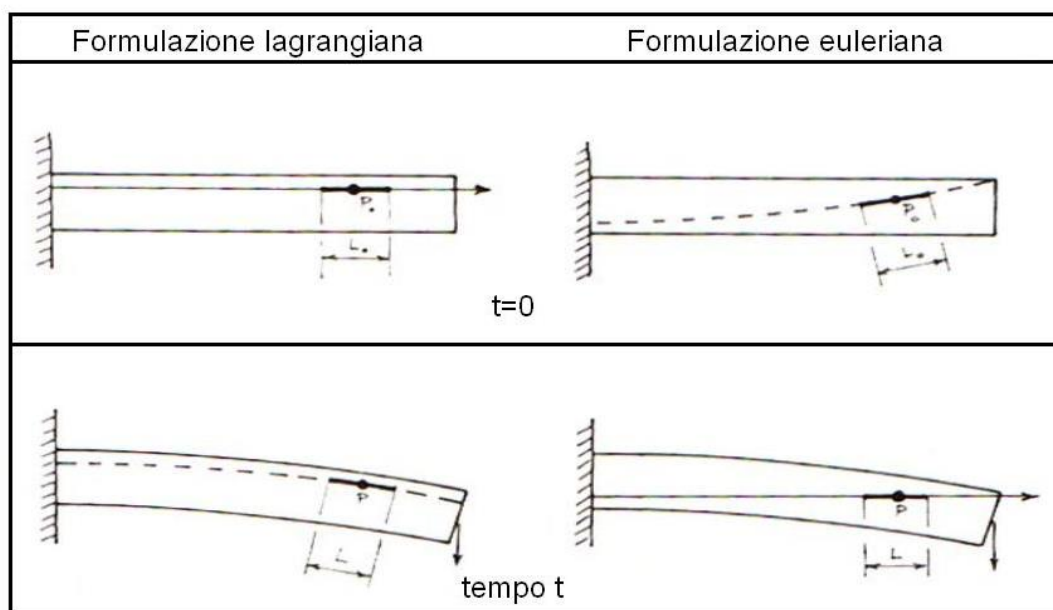


Figura 5.2: Approccio lagrangiano ed euleriano del moto

Con specifico riferimento all'LS-DYNA, l'utente può scegliere la modalità di descrizione degli spostamenti più opportuna, agendo nel campo DCT della keyword ***CONTROL_ALE**. Le due formulazioni fin qui descritte sono da considerarsi, tuttavia, come gli estremi di una scala, tra i quali è compresa una vasta categoria di problemi che, almeno in teoria, sono risolvibili adottando indistintamente l'una o l'altra descrizione del moto.

Per affrontare la risoluzione degli accennati problemi, l'LS-DYNA prevede interessantissime possibilità. E' innanzitutto possibile, mediante le keywords ***ALE_OPTION** e ***CONTROL_ALE**, fare in modo che abbiano, periodicamente ed in modo automatico, luogo dei cosiddetti "remap" o "advection" step, durante i quali il programma effettua sostanzialmente i seguenti compiti:

- Arresta i calcoli;
- Valuta se la mesh si è distorta in modo eccessivo e, in caso affermativo, determina quali nodi è necessario spostare per riportare la mesh ad una deformazione accettabile;

- Effettua i suddetti spostamenti;
- Adatta la soluzione ottenuta fino all'arresto dei calcoli alla nuova mesh così ottenuta;
- Ricomincia i calcoli.

La frequenza con la quale avvengono gli advection step, la scelta dell'algoritmo mediante il quale viene effettuata la "rimappatura" della mesh ed i parametri che lo caratterizzano sono determinati dall'utente delle due cards della keyword ***CONTROL_ALE**.

Sorvolando sulla descrizione dei complicati algoritmi di rimappatura, va comunque detto come per via automatica non sia possibile variare il tipo di elementi con i quali si è discretizzata la struttura. Quanto detto può costituire una grande limitazione in tutti quei casi nei quali, vuoi per il prolungarsi del calcolo, vuoi per la particolarità del modello, il tipo di mesh definito all'inizio del calcolo si trovi a subire distorsioni tanto marcate da richiedere il ricorso ad una formulazione euleriana del problema. In queste situazioni è possibile fermare i calcoli e costruire manualmente una mesh per la nuova configurazione deformata del modello, che può differire dalla precedente anche per la forma degli elementi impiegati, rimappare la soluzione ottenuta al momento dell'interruzione sulla nuova mesh e far ripartire i calcoli, evitando così il ricorso ad una formulazione euleriana, le cui più complesse equazioni rallenterebbero l'azione del calcolatore.

Terminata con ciò la panoramica sulle possibili formulazioni degli spostamenti attivabili dall'LS-DYNA, si passa ora alla descrizione delle modalità secondo le quali il codice procede all'integrazione delle equazioni del moto.

5.3.2 Soluzione delle equazioni di equilibrio

Nell'affrontare problemi non lineari, per i quali è noto come sia possibile pervenire ad una soluzione per la sola via numerica, l'LS-DYNA adopera per l'integrazione delle equazioni di equilibrio, il "*Central Difference Method*". Le equazioni di equilibrio possono, con riferimento ad una formulazione lagrangiana del problema e senza alcuna perdita di generalità, essere poste nella forma:

$$[M]\ddot{U} + [C]\dot{U} + U = R$$

Eq. 5.8

dove $[M]$ indica la matrice delle masse, $[C]$ la matrice rappresentativa dello smorzamento viscoso, $[K]$ la matrice di rigidezza, R il vettore dei carichi esterni, ed U, \dot{U}, \ddot{U} rappresentano invece il vettore degli spostamenti, delle velocità e delle accelerazioni rispettivamente.

Il "*Central Difference Method*" appartiene alla famiglia dei "metodi di integrazione diretta", caratterizzati dalla assenza di qualunque trasformazione delle equazioni di equilibrio (al fine di cercarne una forma più conveniente) prima dell'inizio della loro soluzione numerica. Tali metodi trovano le loro basi teoretiche in due idee fondamentali:

1. Ricerca della loro soluzione soltanto ad intervalli discreti Δt , invece di soddisfare le equazioni di equilibrio (5.8) ad ogni istante t ; ciò equivale ad imporre l'equilibrio tra le forze agenti sul sistema (comprese quelle di inerzia e quelle dovute allo smorzamento viscoso) ad intervalli discreti Δt_i .
2. Assunzione, in secondo luogo, di una variazione lineare delle accelerazioni all'interno di ogni singolo intervallo Δt .

Un metodo di integrazione diretta consente dunque, una volta noti i vettori degli spostamenti, delle velocità e delle accelerazioni, U, \dot{U}, \ddot{U} rispettivamente, la

determinazione della soluzione delle (5.8) all'istante Δt , la quale a sua volta servirà a rintracciare la soluzione all'istante Δt_2 , e così via fino alla fine del periodo T di interesse. In altre parole un metodo di integrazione diretta consiste in un algoritmo che dalla conoscenza delle soluzioni delle equazioni di equilibrio agli istanti 0 , Δt_1 , $\Delta t_1 + \Delta t_2$, ..., t consente di pervenire alla soluzione delle suddette equazioni all'istante $t + \Delta t_n$. In particolare, nell'applicazione del "Central Difference Method", le (5.8) vengono riguardate come un sistema lineare di equazioni differenziali a coefficienti costanti, la cui risoluzione viene eseguita all'interno dell'LS-DYNA, con un time step Δt variabile nel tempo. Tale assunzione, per quanto causa di notevoli complicazioni da un punto di vista analitico, è necessaria dal momento che quello che sarà di qui a poco definito come time step critico, Δt_{cr} , varia al deformarsi della mesh essendo funzione della geometria degli elementi dei quali essa è costituita. Si definiscono quindi gli incrementi Δt al generico istante n , al quale si perviene dopo n step, ed $n + \frac{1}{2}$, al quale si perviene dopo $n + \frac{1}{2}$ step, come:

$$\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$$

Eq. 5.9

$$\Delta t_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \cdot (\Delta t_n + \Delta t_{n+1})$$

Eq. 5.10

dove il time step $n + \frac{1}{2}$ è solitamente chiamato "midpoint time step", dal momento che scandisce proprio la metà del time step considerato.

Nel Central Difference Method l'accelerazione si assume essere data da:

$$\ddot{U}_n = \frac{1}{\Delta t_n} \cdot \left(\dot{U}_{n+\frac{1}{2}} - \dot{U}_{n-\frac{1}{2}} \right) \Rightarrow$$

Eq. 5.11a

$$\Rightarrow \dot{U}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{U}_{n-\frac{1}{2}} + \Delta t_n \cdot \ddot{U}_n$$

Eq. 5.11b

mentre per la velocità si ritiene valida la seguente espressione:

$$\dot{U}_{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t_n + \frac{1}{2}} (U_{n+1} - U_n) \Rightarrow$$

Eq. 5.12a

$$U_{n+1} = U_n + \Delta t_n + \frac{1}{2} \cdot \dot{U}_{n+\frac{1}{2}}$$

Eq. 5.12b

Dalla (5.11b) si ricava la funzione velocità al generico midpoint time step, essendo per quanto detto in precedenza da ritenersi note tutte le grandezze fino all'istante n . Per quanto concerne poi la accelerazione, sostituendo la (5.12a) e la relazione ad essa identica ma riferita allo step precedente nella (5.11a), è possibile pervenire ad una sua espressione in termini della sola funzione spostamento, ossia:

$$\ddot{U}_n = \frac{\Delta t_n - \frac{1}{2} \cdot (U_{n+1} - U_n) - \Delta t_n + \frac{1}{2} \cdot (U_n - U_{n-1})}{\Delta t_n \cdot \Delta t_n - \frac{1}{2} \cdot \Delta t_n + \frac{1}{2}}$$

Eq. 5.13

la quale nel caso in cui ci si riferisca ad un time step Δt costante, è passibile della seguente particolarizzazione:

$$\ddot{U}_n = \frac{1}{\Delta t_n^2} \{U_{n-1} - 2U_n + U_{n+1}\}$$

Eq. 5.14

E' a tal punto doverosa una precisazione: da qui in avanti si riterrà valida l'ipotesi del Δt costante, consapevoli del fatto che, come detto, questa non trova riscontro nell'effettivo modo di operare del programma, e che tuttavia consente una più agevole trattazione di tutte le problematiche cui esso va incontro nell'integrazione delle equazioni di equilibrio mediante il Central Difference Method. E' solo questo lo spirito con il quale si giustifica l'ipotesi, accettata la quale, la (5.14) diventa, più semplicemente:

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2} \cdot \{U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}\}$$

Eq. 5.15

dal momento che la supposta costanza del Δt implica il generico istante, al quale si arriva dopo n step, possa indicarsi più intuitivamente con t . Allo stesso istante, l'espressione della velocità è passibile della forma:

$$\dot{U} = \frac{1}{2\Delta t} \{-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}\}$$

Eq. 5.16

Dal momento che l'obiettivo rimane la determinazione della funzione spostamento all'istante $t+\Delta t$, cioè $U_{t+\Delta t}$, questa può essere ottenuta considerando la (5.8) all'istante t :

$$[M] \cdot \ddot{U}_t + [C] \cdot \dot{U}_t + [K] \cdot U_t = R_t$$

Eq. 5.17

e sostituendo in essa le (5.15) ed (5.16), ottenendo così dopo due banali passaggi:

$$\left\{ \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right\} U_{t+\Delta t} = R_t - \left\{ K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right\} U_t - \left\{ \frac{1}{\Delta t^2} M + \frac{1}{2\Delta t} C \right\} U_{t-\Delta t}$$

Eq. 5.18

dalla quale è possibile ricavare agevolmente $U_{t+\Delta t}$.

Va ora sottolineato come la determinazione della funzione spostamento all'istante $t+\Delta t$, cioè $U_{t+\Delta t}$, sia stata effettuata mediante l'imposizione delle condizioni di equilibrio all'istante t . Per tale motivo il Central Difference Method è definito anche come un metodo di integrazione esplicita, in contrapposizione con altri metodi di integrazione delle equazioni di equilibrio, che pervengono alla determinazione della funzione spostamento all'istante $t+\Delta t$, cioè $U_{t+\Delta t}$, mediante l'imposizione delle condizioni di equilibrio allo stesso istante $t+\Delta t$ e che, pertanto, sono detti metodi impliciti; tra questi è possibile citare, a puro titolo di esempio, il Metodo di Newmark, utilizzato da un altro diffusissimo codice FEM, l'ANSYS, per l'integrazione dei problemi lineari.

Non può inoltre sfuggire come la determinazione della funzione $U_{t+\Delta t}$ coinvolga le funzioni U_t e $U_{t-\Delta t}$, ragione per la quale è necessario determinare una speciale procedura di partenza al fine di poter determinare la funzione spostamento all'istante Δt . Ritenendo assegnate le condizioni iniziali, e quindi note le funzioni U, \dot{U}, \ddot{U} , è possibile utilizzare le (5.15) e (5.16) per determinare la funzione spostamento all'istante $-\Delta t$, cioè:

$$U_{-\Delta t}^{(i)} = U_0^{(i)} - \Delta t \cdot \dot{U}_0^{(i)} - \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{U}_0^{(i)}$$

Eq. 5.19

nella quale l'apice (i) indica l'i-esima componente del vettore considerato.

Supponiamo ora che il sistema non sia caratterizzato da alcuna forma di smorzamento, il che equivale ad imporre che sia $[C]=[0]$. In tal caso la (5.18) assume la seguente forma:

$$\left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{U}_{t+\Delta t} = \hat{\mathbf{R}}_t$$

Eq. 5.20

nella quale:

$$\hat{\mathbf{R}}_t = \mathbf{R}_t - \left(\mathbf{K} - \frac{2}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{U}_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2} \mathbf{M} \right) \mathbf{U}_{t-\Delta t}$$

Eq. 5.21

Risulta quindi evidente che se la matrice delle masse è diagonale, il sistema di equazioni (5.8) può essere risolto effettuando soltanto i prodotti tra matrici necessari alla determinazione del vettore $\hat{\mathbf{R}}_t$. Una volta eseguite tali operazioni sarà infatti possibile ottenere la generica i-esima componente del vettore spostamento all'istante $t+\Delta t$, mediante la seguente scrittura:

$$U_{t+\Delta t}^{(i)} = \hat{R}_t^{(i)} \left(\frac{\Delta t^2}{m_{ii}} \right)$$

Eq. 5.22

dove $U_{t+\Delta t}^{(i)}$ ed $\hat{R}_{t+\Delta t}^{(i)}$ indicano la i-esima componente dei vettori $\mathbf{U}_{t+\Delta t}$ ed $\hat{\mathbf{R}}_{t+\Delta t}$ rispettivamente, ed m_{ii} rappresenta l'i-esimo elemento della matrice (diagonale) delle masse. Si assume inoltre che sia $m_{ii} > 0$.

Il vantaggio derivante dall'applicazione del Central Difference Method appare ora evidente, dal momento che, come si evince dalla (5.22), non è necessario calcolare le matrici di massa e di rigidezza della intera struttura meshata. In altre parole, mediante le suddette formule è possibile rintracciare la soluzione $\mathbf{U}(t)$ operando nel dominio del singolo elemento. Il metodo diviene poi maggiormente efficace qualora più elementi successivi dovessero avere le stesse matrici di massa e di rigidezza; in tal caso infatti risulta sufficiente leggere dalla memoria le matrici relative al primo elemento della serie. Operando in tal maniera è possibile risolvere tanto efficacemente quanto velocemente anche sistemi di dimensioni molto elevate.

Stando a quanto finora esposto, l'efficacia del metodo è fortemente condizionata dal considerare solo matrici di massa simmetriche e dal trascurare gli effetti di un qualunque tipo di smorzamento viscoso (cioè dipendente dalla velocità). Tuttavia considerando matrici di smorzamento simmetriche i vantaggi descritti in precedenza rimangono inalterati. Per quanto riguarda poi la necessità di dover considerare solo matrici di massa simmetriche, è noto come ai fini pratici ciò non rappresenti assolutamente un serio problema.

Altra considerazione da fare in merito all'utilizzo del Central Difference Method riguarda la misura del time step Δt , che deve sempre risultare minore del suo valore critico Δt_{cr} determinabile a partire dalle matrici di massa e rigidità complessive della mesh. In particolare si dimostrerà in seguito che deve essere sempre verificata la seguente scrittura:

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{T_n}{\pi}$$

Eq. 5.23

dove T_n rappresenta il più piccolo periodo naturale dell'insieme di elementi finiti costituenti la mesh. La (5.23), così come in precedenza esposto per la (5.22) richiede che sia verificata la condizione $m_{ii} > 0 \forall i$, dal momento che la presenza di uno zero nella diagonale della matrice di massa equivarrebbe ad affermare la presenza di un elemento caratterizzato dall'avere periodo nullo. Poiché in pratica è sempre $m_{ii} > 0 \forall i$, la (5.23) restituisce una limitazione effettiva alla grandezza del time step massimo da utilizzare nel processo di integrazione. In alcuni casi la (5.23) può non condurre ad un Δt eccessivamente piccolo, ma in generale da essa si ricava una misura del time step che può essere anche diverse volte più piccola di quella che assicura la stabilità del processo di integrazione.

Da quanto detto, e dal momento che l'onere computazionale connesso al processo di integrazione è all'incirca inversamente proporzionale alla dimensione del time step utilizzato, segue che un generico aumento del time step, pari ad m volte la sua

dimensione, implica una riduzione del tempo di calcolo anch'essa circa uguale ad m . La determinazione e la modalità di gestione del time step più opportuno da parte di LS-DYNA in un processo di integrazione diretta sarà discussa nel dettaglio in uno dei prossimi paragrafi; comunque è opportuno anticipare con una semplice considerazione il motivo per il quale le dimensioni del Δt devono essere mantenute ridotte. Si supponga a tal fine di dover integrare in maniera diretta un sistema di equazioni di equilibrio del tipo (5.8) avente dimensione n delle matrici relativamente grande, almeno pari a 100 per intenderci. Si stabilisca il time step in base alla (5.23), e si immagini poi di ridurre il più piccolo elemento della diagonale della matrice di massa fino ad avvicinarlo allo zero, senza però mai raggiungerlo poiché, come precedentemente detto, avere un elemento nullo nella matrice di massa equivarrebbe ad avere T_n anch'esso pari a zero il che renderebbe impossibile il processo di integrazione. Ad ogni modo, ciò che interessa notare è che all'avvicinarsi allo zero dell'elemento della diagonale della matrice di massa, il più piccolo periodo del sistema, e con esso Δt , tende a zero. Da quanto detto si evince chiaramente come la diminuzione di una massa del sistema (*mass element*) comporta la necessità di una concreta riduzione del time step con il quale viene effettuata l'integrazione. Tuttavia, essendo le dimensioni del sistema molto grandi, sarebbe lecito aspettarsi che la risposta dinamica del sistema vari molto poco al ridursi della massa del più piccolo elemento, perfino al suo annullarsi. Se ne ricava che la riduzione del time step conseguente alla riduzione del più piccolo elemento della diagonale della matrice di massa comporti un ingiustificato aumento dell'onere computazionale connesso al processo di integrazione. E' poi da aggiungere che la stessa condizione sarebbe raggiunta qualora la rigidità di un solo elemento dovesse aumentare.

Gli schemi di integrazione che, come il Central Difference Method, richiedono l'utilizzo di un time step Δt minore di una quantità Δt_{cr} sono detti

condizionatamente stabili. L'utilizzo di un time step maggiore di quello critico comporta l'instabilità del processo di integrazione, dove per tale si intende la crescita incondizionata di un qualsiasi errore numerico dell'integrazione che porta al fallimento dell'intero processo.

5.4 Algoritmi di contatto

Essendo LS-DYNA un codice dedicato essenzialmente allo studio delle problematiche legate al metalforming ed alla simulazione dei crash test, appare necessario illustrare come il programma gestisce gli slittamenti, i contatti e gli impatti che hanno luogo all'interfaccia tra "parti diverse" oppure lungo la stessa superficie, nel caso in cui sia una singola parte a ripiegare su se stessa, come può avvenire, ad esempio, nello studio di fenomeni di *buckling* (instabilità). Esistono tre diversi modi per approcciare un problema di contatto tra due superfici, e sono:

1. Metodo dei vincoli cinematici;
2. Penalty Method;
3. Metodo dei parametri distribuiti.

ognuno dei quali caratterizzato da differenti aspetti, che ne differenziano il campo di possibile applicazione.

E' dunque naturale che anche gli algoritmi di contatto ed impatto implementati nell'LS-DYNA, che nei suddetti metodi trovano il loro fondamento teorico, manifestino una spiccata attitudine alla trattazione di problematiche specifiche.

Occorre a tal punto premettere alcune considerazioni. Nel prosieguo si impiegherà diffusamente il termine "*segmento di contatto*", il cui significato fisico è in contrasto con quanto suggerito dall'intuito, dal momento che il termine indica la porzione di superficie di contatto, delimitata da 4 nodi, se la mesh della stessa è effettuata ricorrendo ad elementi quadrilateri, oppure da 3 nodi, nel caso in cui la suddetta

mesh sia costituita da elementi triangolari. Si parlerà frequentemente anche di “*interfaccia di contatto*”, intendendo con ciò riferirsi contemporaneamente ad entrambe le superfici coinvolte nel contatto. Di queste, una andrà definita come **master**, e risulterà pertanto costituita da segmenti, nel senso di cui sopra, e nodi master, mentre l'altra andrà invece definita come **slave**, da cui la definizione di segmenti e nodi slave. Tale definizione consente all'algoritmo di determinare la posizione della superficie master in funzione della posizione della superficie slave. Sarà poi successivamente chiarito come, in relazione al solo Penalty Method, si possa parlare di approccio simmetrico ad entrambe i lati dell'interfaccia (che vengono cioè considerati in maniera equivalente ai fini della determinazione del contatto), rendendo così di fatto superflua la suddetta definizione. I manuali raccomandano di definire come master la superficie dalla mesh meno fitta, a meno che non sussista una cospicua differenza di densità di massa, nel qual caso è consigliabile definire come master la superficie dalla più elevata densità.

Relativamente all'LS-DYNA, l'utente può definire senza problemi ed in modo completo dal LS-PREPOST un'interfaccia di contatto che sarà poi tradotta nel file .dyn da due o tre control cards, definenti il tipo di “interface” (cioè, in sostanza, identificanti l'algoritmo di contatto impiegato), seguite dall'elenco, in ordine sparso, dei segmenti costituenti le superfici master e le superfici slave, così come in precedenza definite nel LS-PREPOST dall'utente.

5.4.1 Metodo dei vincoli cinematici

Il metodo in oggetto fu implementato per la prima volta nel DYNA2D in ambito bidimensionale, per essere poi esteso in ambito tridimensionale all'interno del DYNA3D. In esso vengono imposti dei vincoli alle equazioni dei nodi slave,

bloccandone il grado di libertà traslazionale in direzione normale alla superficie master.

Adoperando il metodo dei vincoli cinematici, è possibile incontrare dei problemi nel caso in cui la mesh della superficie master sia più fitta di quella slave, come mostrato nella figura 5.3. In tal caso, infatti, è possibile che alcuni nodi master penetrino all'interno della superficie slave senza incontrare alcuna resistenza, creando così una piegatura nella superficie di contatto.

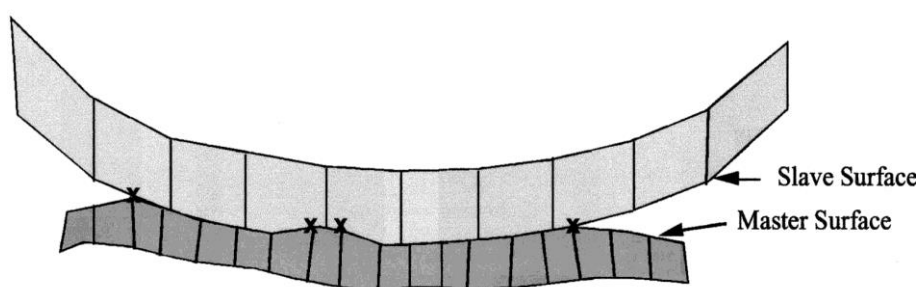


Figura 5.3 Problemi relativi al metodo dei vincoli cinematici

Operando con questo metodo, la riferita eventualità è tutt'altro che infrequente, specialmente quando le pressioni di contatto sono molto alte. Tuttavia, se è importante notare che una accurata definizione della superficie può limitare in misura considerevole il problema, è altrettanto importante notare come una meshatura che riesca in tale scopo all'istante iniziale, possa addirittura amplificarlo negli istanti successivi, come accade, ad esempio, nell'espansione dei prodotti gassosi dell'esplosione di un gas contro una superficie.

5.4.2 Penalty Method

Implementato sia nei codici espliciti DYNA2D e DYNA3D, sia in quelli impliciti della LSTC (NIKE 2D e NIKE 3D), questo metodo trova i suoi fondamenti in una semplice idea: posizionare delle molle di opportuna rigidità e prive di massa tra i nodi che tendono alla penetrazione dell'interfaccia e l'interfaccia stessa. La citata simmetria

con cui tale metodo approssica i due lati dell'interfaccia è inoltre causa di una ridotta tendenza all'eccitazione di fenomeni oscillatori, nel caso in cui gli elementi si deformino in modo da originare fenomeni di hourglassing. La rigidezza dell'interfaccia va scelta in modo tale che risulti all'incirca dello stesso ordine di grandezza della rigidezza del generico elemento che affaccia sulla superficie di contatto in direzione normale all'interfaccia. Operando in tal modo, la dimensione del time step di integrazione non risente delle modifiche effettuate.

In ogni caso, nell'eventualità in cui la pressione di contatto risulti troppo alta, anche ora possono verificarsi delle inaccettabili penetrazioni, eliminabili mediante un aumento del valore della rigidezza all'interfaccia e/o una diminuzione del valore del time step. Poiché quanto detto comporta un deciso aumento dell'onere computazionale dovuto all'aumento del numero di passi di integrazione richiesti, è stata sviluppata un'opzione che consente il solo slittamento dei nodi all'interfaccia, rivelatasi poi fondamentale nella trattazione dei problemi di diffusione dei prodotti gassosi di una esplosione e della loro interazione con una superficie solida: la cosiddetta "sliding only option" la quale consente di evitare il ricorso al Penalty Method e conduce automaticamente all'introduzione del Metodo dei parametri distribuiti, oggetto del paragrafo che segue.

5.4.3 Distributed Parameters Method

Implementato nei codici DYNA fin dalla fine degli anni '70, il Distributed Parameters Method trova il suo fondamento ideologico nell'idea di distribuire metà della massa dei nodi slave interessati al contatto sulla superficie master da essi ricoperta, la quale risulta essere inoltre caricata da una distribuzione di pressione determinata dalla sollecitazione interna di ogni elemento. Completata la distribuzione di massa e pressione, è possibile determinare la nuova accelerazione della superficie master.



Successivamente vengono imposti dei vincoli alle accelerazioni ed alle velocità dei nodi slave, al fine di assicurare che il loro moto si svolga sulla superficie master. Operando nel modo descritto, si ignora ogni possibile penetrazione della superficie master nel volume delimitato dalla superficie slave.

E' ormai evidente come lo scopo ultimo di ogni algoritmo di contatto sia il medesimo: evitare che le superfici costituenti l'interfaccia si compenetrino durante l'intervallo di tempo analizzato. Può tuttavia accadere per svariati motivi, che le superfici in contatto si compenetrino ancor prima di iniziare i calcoli, cioè all'istante 0. Dette penetrazioni, a loro volta, possono creare, nella fase iniziale dell'integrazione, dei problemi numerici la cui entità è tale da rendere necessaria la loro immediata correzione, al fine di garantire l'efficacia del calcolo.

Nella maggior parte dei casi, la presenza di compenetrazioni iniziali si manifesta con una precoce crescita (in senso negativo) dell'energia di contatto. Normalmente vengono prodotti dei messaggi di Warning, nel file D3HSP e nel Messag file, che elencano le penetrazioni iniziali dei nodi attraverso i segmenti di contatto, unitamente alle modifiche operate dall' LS-DYNA al fine di rimuoverle.

Va tuttavia sottolineato come, a volte, alcune di quelle correzioni non siano effettivamente risolutive del problema, stante la reale possibilità che la causa delle penetrazioni iniziali possa essere rappresentata da un errato posizionamento della superficie media di uno shell, oppure da una non corretta determinazione del suo spessore.

A questo punto è necessario sottolineare come alcune compenetrazioni iniziali possano non essere rilevate; ciò accade ogni qual volta un nodo penetra completamente la superficie, come illustrato in figura 5.4a, oppure quando le superfici superiore ed inferiore di uno shell siano raccordate da una semicirconferenza di raggio pari alla metà dello spessore dello stesso shell, come mostra la figura 5.4b.

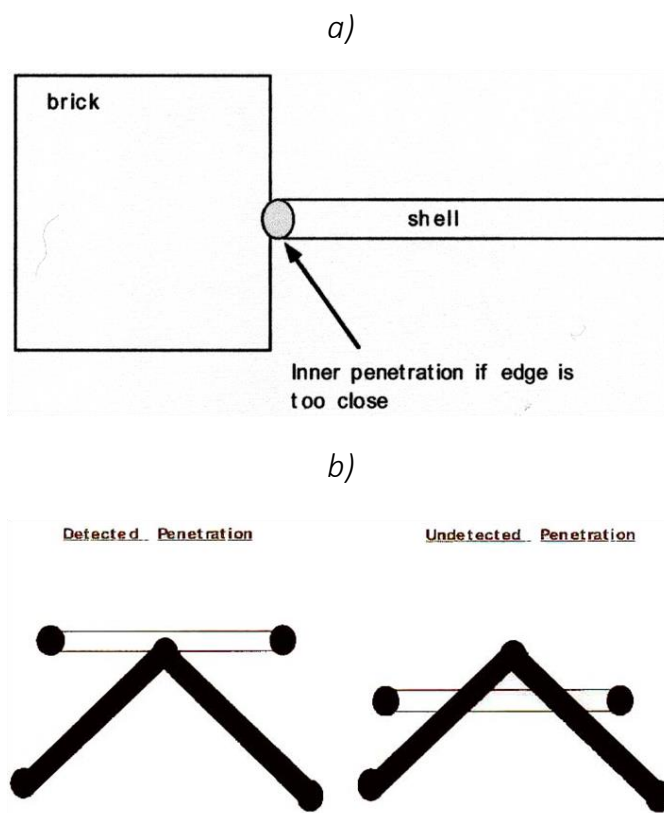


Figura 5.4 Problemi di rilevazione di compenetrazioni

In conclusione, al fine di evitare ogni forma di compenetrazione iniziale, ed i problemi ad esse conseguenti, appare imprescindibile attenersi alle seguenti regole:

- ✓ determinare con precisione gli offset necessari a tenere conto di tutti gli spessori delle parti in gioco;
- ✓ infittire in maniera anche consistente la mesh, nel caso in cui parti adiacenti abbiano notevoli curvature;
- ✓ determinare con precisione gli spessori degli shell e le sezioni di tutte le beam, in particolare quando si opera con corpi rigidi;
- ✓ ridurre, se necessario, gli spessori delle parti, prestando attenzione a non compromettere in maniera inaccettabile le prestazioni strutturali del modello;



- ✓ usare gli “spot welds” (punti di saldatura), anziché dei merged nodes, per realizzare l’offset della superficie media degli shell.

5.5 Libreria di elementi

La ricca biblioteca di elementi compresa nell’LS-DYNA, è qui di seguito elencata:

- ✓ Membranes (Underintegrated; Fully integrated)
- ✓ 4-noded Thin Shells (Belytschko-Tsay shell; Belytschko-Wong-Chiang shell; Hughes-Liu shells; Selective reduced integration (SRI); 1-point integration)
- ✓ Triangular Shell Elements (CO triangle; Discrete Kirchhoff triangle)
- ✓ 8-noded Thick Shells (1-point integration; Hughes-Liu shell (with 4-point SRI))
- ✓ Solids (8-node brick elements; with 1-point integration and hourglass control; with SRI; quadratic with nodal rotations and 14-point integration; Arbitrary Lagrangian-Eulerian brick elements; Eulerian brick element; Eulerian boundary element; Quadratic 4-node tetrahedron with nodal rotations; Wedge element)
- ✓ Beams (Hughes-Liu beam; Belytschko resultant beam; Belytschko-Schwer integrated solid and tubular beam; Discrete 3D beam element)
- ✓ 2-noded Truss Element
- ✓ Cable Elements
- ✓ Springs and Dampers (Translational Linear; Rotational Nonlinear; Lumped Masses)
- ✓ Seatbelt Elements
- ✓ Rigid Bodies
- ✓ Multibody dynamics
- ✓ Joints: spherical, revolute, cylindrical, etc. (Generalized joint stiffness definitions; Flexion-torsion joint; Cardan joint)

- ✓ Rigid body to rigid body contact options
- ✓ Stoppers
- ✓ Inertial properties: user-input, or computed from the finite element mesh
- ✓ Analytical and CAD surface definitions
- ✓ Rigid to deformable material switching
- ✓ Weld Modeling (Layered spot welds with failure; Fillet welds with failure; Butt welds with failure; Combination butt and fillet welds)

Non si ritiene tuttavia opportuno in questa sede dilungarsi nella descrizione matematica di alcuno di essi per evitare di ridurre il presente lavoro ad una traduzione dei manuali che risulterebbe banale, per quanto preziosa.

Tuttavia non ci si può esimere dal considerare come tutti gli elementi strutturali (cioè beams, shells e bricks), a seconda delle particolari funzioni che ne descrivono il comportamento, possano presentare dei modi di deformarsi ai quali corrisponde una energia di deformazione nulla. E' questo il fenomeno cosiddetto dell'*hourglassing*, di seguito descritto, insieme con i rimedi del caso adottati dall'LS-DYNA, in relazione ad un semplicissimo elemento membranale piano, caratterizzato quindi da due soli g.d.l. per nodo, non cambiando in alcun modo i concetti esposti al crescere della complessità dell'elemento. Si consideri dunque la seguente figura 5.5.

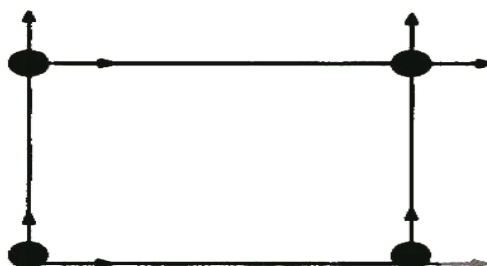


Figura 5.5: Elemento membranale piano

L'elemento considerato ha dunque in totale 8 gradi di libertà ed altrettanti modi di spostarsi, tre dei quali propri di un corpo rigido ed indicati in figura 5.6.

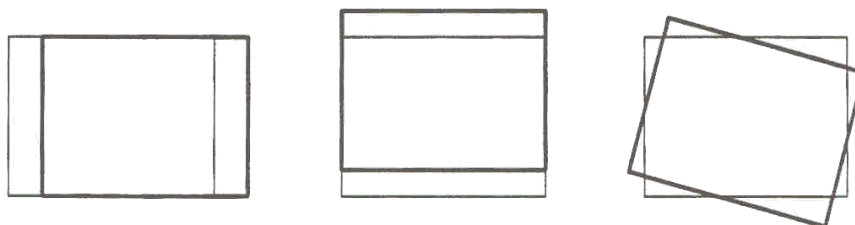


Figura 5.6 Moti rigidi dell'elemento membranale piano

Avendo poi l'elemento un solo punto di integrazione, possono essere determinate solo le tensioni di trazione, compressione e taglio, ragione per la quale l'elemento ha tre modi di deformarsi ai quali è associata una rigidezza che li contrasta, e indicati in figura 5.7.

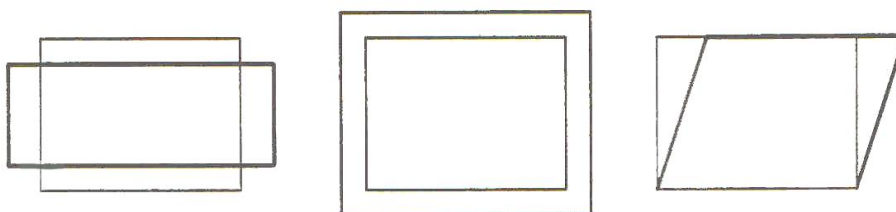


Figura 5.7 Modi di deformazione dell'elemento membranale piano

Ai rimanenti modi, l'elemento non è in grado di reagire, e pertanto i modi indicati in figura 5.8 non sono contrastati dalla rigidezza dell'elemento:

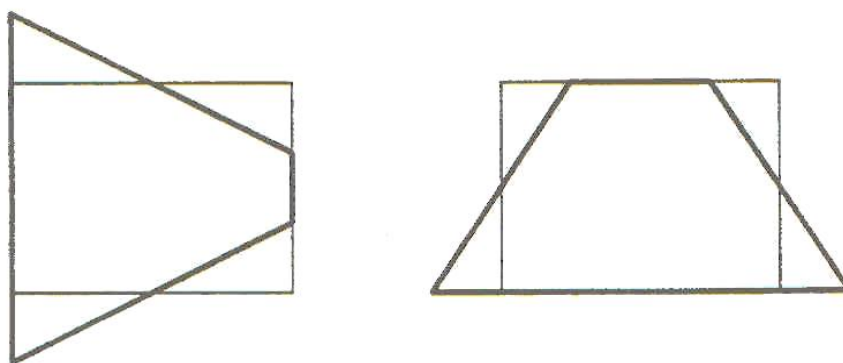


Figura 5.8: Modi di deformazione non contrastati dalla rigidità dell'elemento membranale piano

E' quando la deformazione della struttura discretizzata coinvolge sensibilmente gli ultimi due modi di deformazione dell'elemento che si parla di hourglassing, fenomeno al quale sono connessi i seguenti problemi:

- ✓ riduzione del time step, dovuta alla riduzione delle dimensioni critiche dell'elemento cui si assiste quando hanno luogo fenomeni di hourglassing;
- ✓ possibilità di fallimento dell'analisi, nel caso estremo in cui un lato dell'elemento diventi di lunghezza nulla;
- ✓ progressiva perdita di precisione nei calcoli all'aumentare dell'importanza assunta dal fenomeno.

LS-DYNA prevede due strumenti per il controllo dell'hourglassing: in primo luogo l'utente può attivare una particolare forma di smorzamento che riesce a contrastare efficacemente i modi di deformazione che originano hourglassing, senza interessare in modo significativo la struttura reale dell'elemento; in secondo luogo, in casi estremi, nei quali la suddetta forma di smorzamento non riesce a contrastare efficacemente il fenomeno, è possibile attivare una forma di "hourglass stiffness" (rigidezza di hourglassing) mediante la quale, in pratica, si applicano delle forze finalizzate al contrasto di quei termini della sollecitazione interna dell'elemento che generano l'hourglassing. Tuttavia



tale approccio, pur risultando più efficace del precedente rimedio, può generare cospicui problemi dovuti proprio alla presenza delle suddette forze, che possono falsare il risultato finale. Il controllo può essere effettuato attivando il campo HGEN della keyword ***CONTROL_ENERGY**, che consente il calcolo della “hourglass energy” (ossia dell’energia di deformazione connesse alle suddette forze) e la sua inclusione nel bilancio totale dell’energia. L’hourglass energy è poi riportata nei files di output GLSTAT e MATSUM, e quindi facilmente diagrammabile dal Graph Process. La letteratura suggerisce che l’energia di hourglass non superi il 5-10% dell’energia di deformazione totale per poter ritenere numericamente validi i risultati di un’analisi. Al di là dei controlli numerici di cui dispone il codice, e che sia chiaro rallentano il lavoro del calcolatore, la miglior prevenzione del fenomeno resta quella effettuabile dall’utente nella fase di modellazione, seguendo alcune piccole e semplici norme pratiche, riportate nella figura 5.9, che davvero non necessita di alcun commento.

PREVENTING HOURGLASSING BY MODELLING

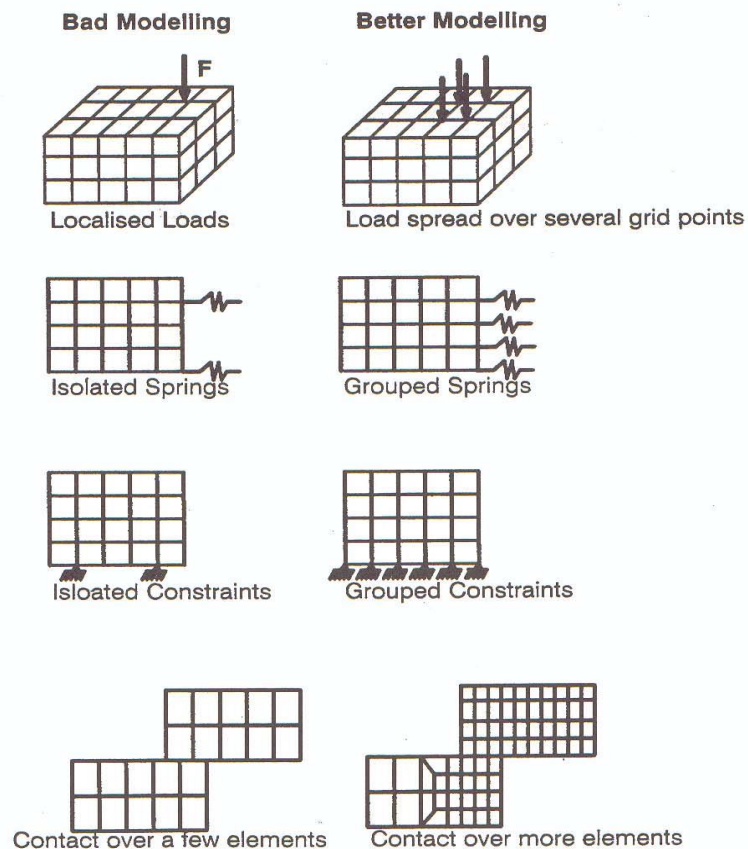


Figura 5.9 Norme pratiche per la prevenzione del fenomeno dell'hourglassing

5.6 Riduzione del tempo di calcolo

Nelle simulazioni relative ad analisi nonlineari con metodo esplicito, il tempo di calcolo può essere ridotto notevolmente usando il MASS SCALING e/o un'alta velocità di lavorazione. Entrambi i metodi introducono effetti dinamici artificiali, che possono essere ragionevolmente minimizzati in senso ingegneristico.

Il parametro di mass scaling è la taglia del time step:

$$dt_{2ms} = \frac{1}{V_{MAX} \cdot n_{cpm}}$$

dove:

V_{MAX} è la velocità massima di lavorazione (si consiglia un valore non superiore a 2 mm/ms) e n_{cpm} è il numero di cicli per millimetro (è un parametro che per molte simulazioni è posto pari ad un valore compreso tra 100 e 1000).

5.7 Modellazione FE della prova meccanica

In virtù delle osservazioni fatte nei precedenti paragrafi, date le elevate deformazioni in gioco, si è optato per eseguire una soluzione esplicita, ossia mediante l'utilizzo del codice Ls-Dyna. Oltre al provino, che è stato realizzato come illustrato nel Capitolo 4, per simulare una prova di compressione, sono state modellate due superfici (Figura 5.10) nel software Ls-Prepost, le quali fungeranno da piatto e da traversa durante la prova di compressione. Si faccia presente che tutte le operazioni che verranno illustrate in questo paragrafo sono analoghe per le 5 simulazioni eseguite ($V_f=0,77$). Nei paragrafi seguenti si farà riferimento al primo modello realizzato.

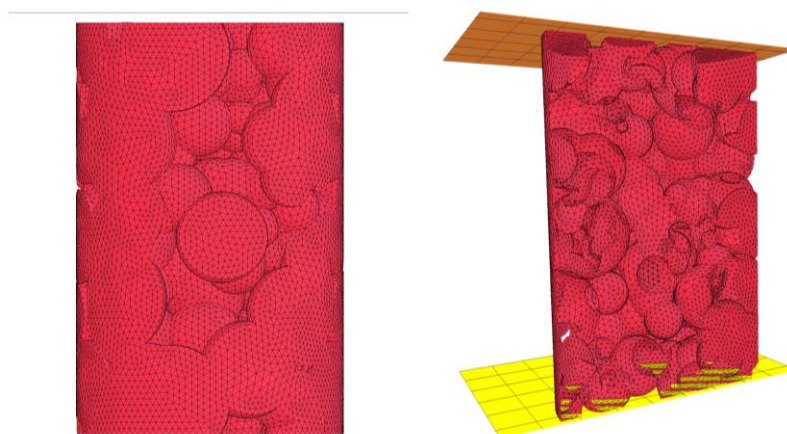


Figura 5.10 - vista frontale ed in sezione di un test di compressione

5.7.1 Meshing

L'aspetto senz'altro basilare della modellazione di un fenomeno fisico è costituito dalla creazione della mesh, ovvero della discretizzazione delle parti che entrano a far parte del processo che si vuol simulare.

Il modello in analisi, essendo un modello per superfici, è stato discretizzato con degli elementi bidimensionali di tipo *shell*. In particolare la scelta è ricaduta su degli elementi triangolari del primo ordine, poiché la geometria risulta essere molto complessa. Nello specifico sono stati utilizzati gli elementi CTRIA3 della libreria di Ls-Dyna. Nella Figura 5.11 viene riportato il modello di schiuma di alluminio Meshato.

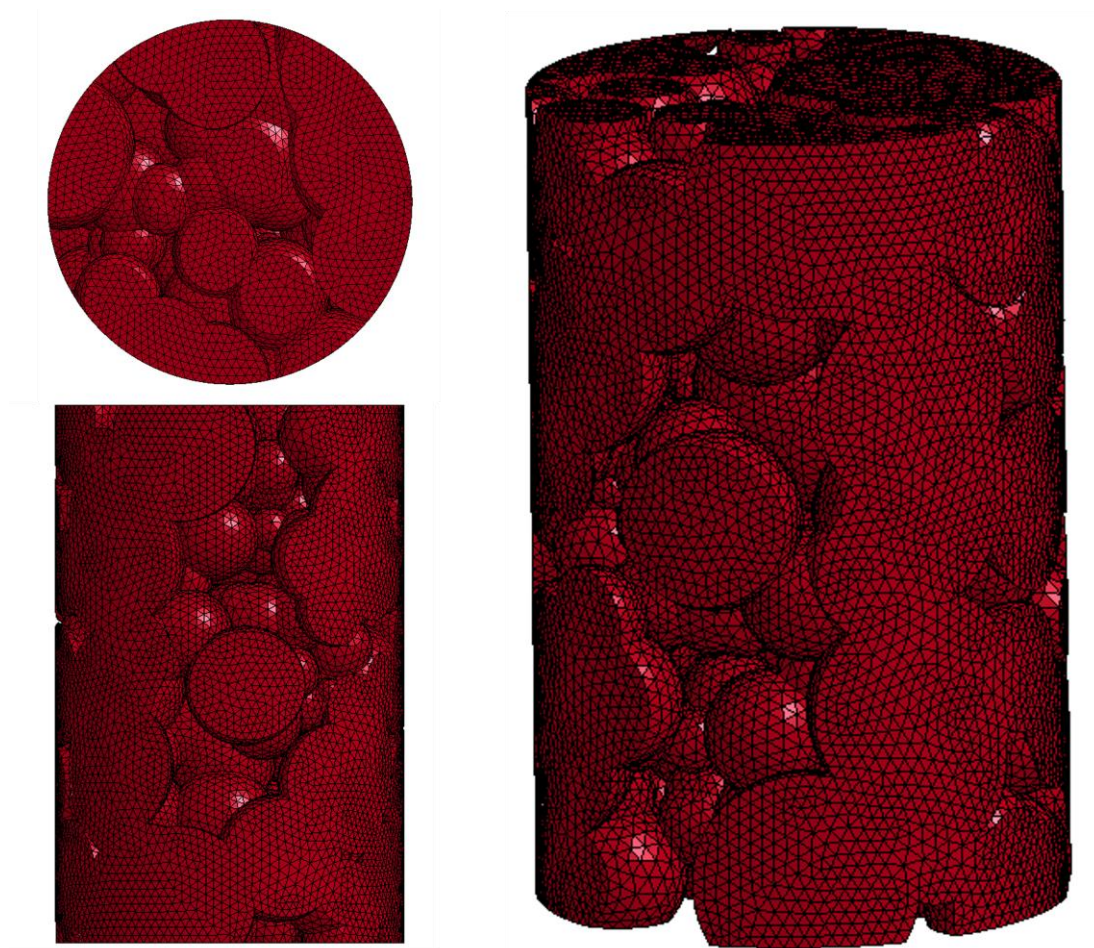


Figura 5.11 - Mesh del provino di schiuma metallica

Come si nota dalla Figura 5.11 la mesh risulta essere molto fitta, considerando che è stato utilizzato un *GEL* variabile tra 1 e 2. Questo inconveniente è stato inevitabile, poiché essendo la geometria molto complessa, discretizzare il modello con un mesh grossolana portava a degli errori durante il check della mesh ed il susseguente fail dell'analisi.

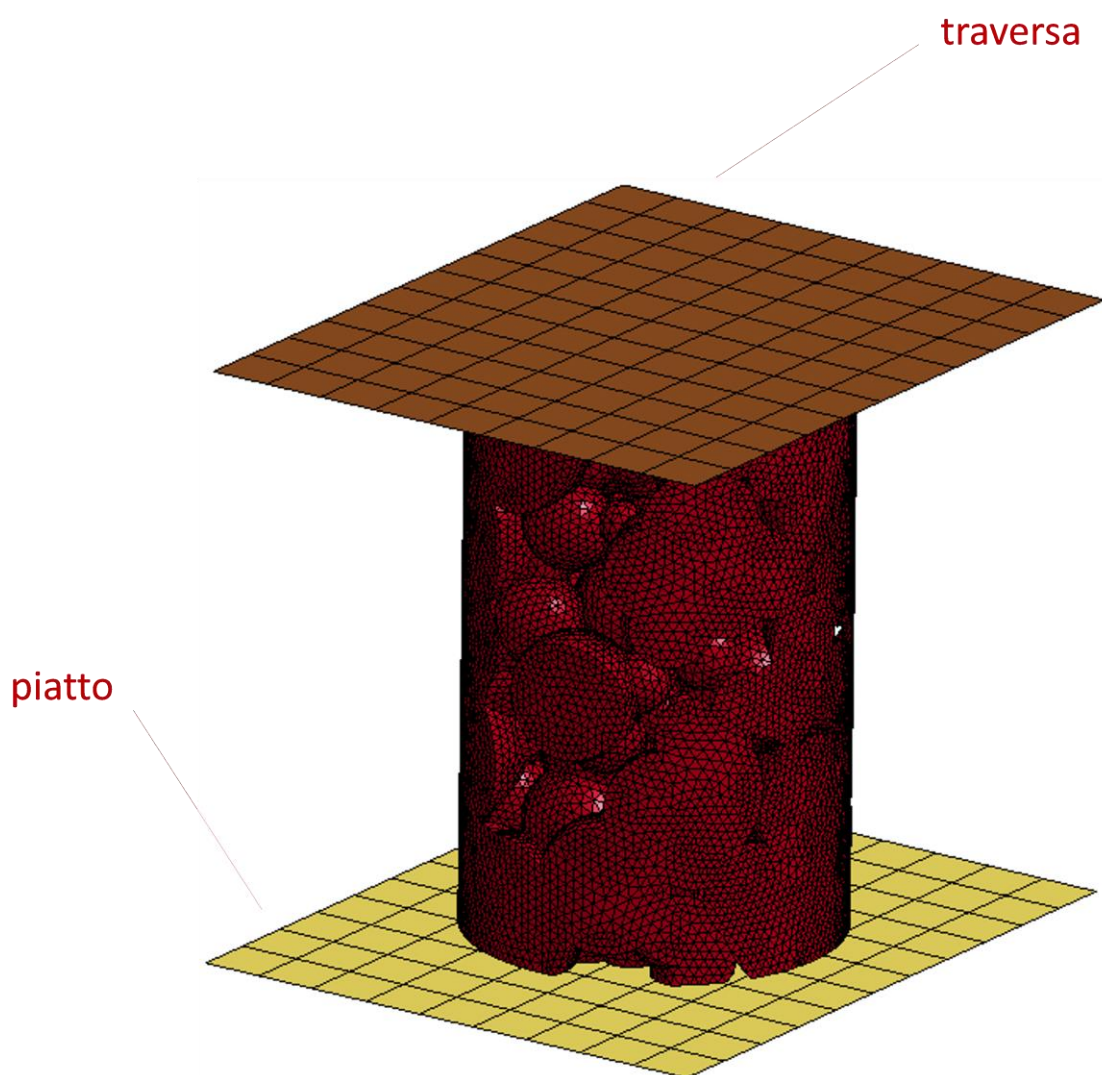


Figura 5.12 - Modello completo discretizzato

Per quanto concerne il piatto e la traversa, essendo due superfici regolari, queste sono state discretizzate con degli elementi quadrangolari del primo ordine. Nello specifico è stato utilizzato l'elemento *CQUAD4* della libreria

di Ls-Dyna. In questo caso, al contrario del precedente, è stata utilizzata un mesh più grossolana con un $GEL=5$ (uguale per tutte le simulazioni), questo perché sia il piatto che la traversa sono stati assunti come dei corpi rigidi, poiché non è interesse del caso studio valutare spostamenti, deformazioni e tensioni cui questi sono sottoposti. Nella Figura 5.12 viene mostrato il modello meshato. Di seguito viene illustrato un sommario del primo modello:

Model Summary	
Number of grid points	26338
Number of CQUAD4 Elements	198
Number of CTRIA3 Elements	52444

Tabella 5.1- Sommario del modello del primo modello; frazione volumetrica di aria pari a 0.77

La Figura 5.13 mostra una sezione del modello:

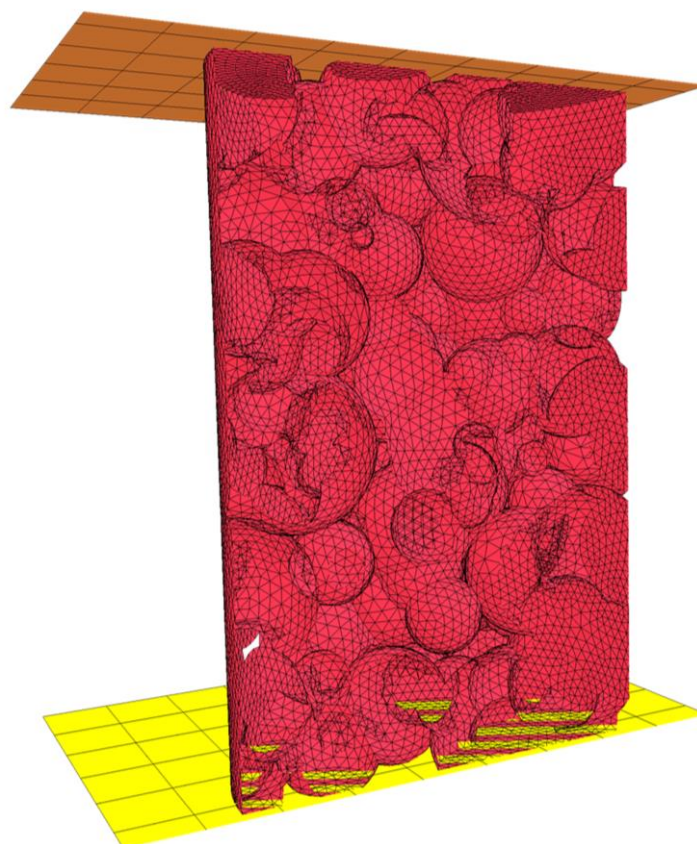


Figura 5.13 - Vista in sezione del modello FEM

Osservando la figura, si nota che le celle di forma sferica, sono tutte interconnesse tra di loro e sono cave. Inoltre le intercapedini poste tra le celle sferiche, formano anche esse delle porosità con delle geometrie assolutamente casuali. Tale fenomeno approssima ancora meglio la morfologia della schiuma.

5.7.2 Modellazione delle parti

Per simulare una prova di compressione si è proceduto alla realizzazione del modello agli elementi finiti, costituito da tre elementi: il piatto, la traversa e il provino. Per tutte e tre le geometrie è stata utilizzata una mesh di tipo shell, essendo il modello per superfici.

In particolare per il piatto e per la traversa è stato impiegato il modello di default, rappresentato dalla formulazione proposta da *Belytschko* e *Tsay*. Tale formulazione risulta preferibile nel caso si necessiti di una maggiore velocità computazionale, abbinata ad una minore precisione nel calcolo delle sollecitazioni e delle deformazioni della parte, ininfluente nell'applicazione in analisi.

Per gli elementi costituenti il provino di schiuma metallica, invece, è stata utilizzata la formulazione numero 16, ovvero elementi shell di tipo *Hughes – Liu Fully Integrated*, da preferirsi per un'analisi più accurata.

Per assegnare lo spessore agli elementi shell è stata presa in considerazione la relazione:

$$\rho = \frac{m}{V_e}$$

Eq. 5.24

Dove:

ρ è la densità dell'alluminio

m è la massa del provino

V_e è il occupato da tutte le pareti delle celle, ossia il volume effettivo.

Dato che il V_e può essere calcolato come:

$$V_e = S \times t$$

Eq. 5.25

Dove:

S è la superficie totale del modello

t è lo spessore medio delle pareti delle celle.

Sostituendo la

Eq. 5.25 nella

Eq. 5.24 ed isolando lo spessore t si ottiene:

$$t = \frac{m}{S \times \rho}$$

Eq. 5.26

In Ls-Prepost è possibile richiedere la misura della superficie totale che in questo caso risulta essere pari a:

$$S = 33156 \text{ mm}^2$$

Da cui si ricava che t è uguale a:

$$t = \frac{46,75 \text{ [g]}}{33156 \text{ [mm}^2\text{]} \times 2,7 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{g}}{\text{mm}^3}\right]} = 0,5 \text{ mm}$$

Eq. 5.27

Tale valore risulta essere prossimo a quello misurato sui provini reali, pertanto anche da questo punto di vista il modello virtuale approssima molto bene il provino reale.

5.7.3 Il materiale

I materiali impiegati per la simulazione di una prova di compressione sono sostanzialmente due:

- Materiale rigido per il piatto e per la traversa
- Materiale a o comportamento elasto-plastico per il provino.

In particolare, per quanto riguarda il materiale rigido adottato per il piatto e per la traversa, si è scelto il material type MATD020, presente nelle biblioteche di LS-DYNA, specifico per la simulazione di corpi dal comportamento rigido. Per quanto riguarda il provino invece, le caratteristiche meccaniche del materiale implementato nel software sono relative alla lega AlSi10 utilizzata per questo progetto di ricerca. Il codice di materiale utilizzato è il MAT024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY cui contempla il comportamento elasto-plastico del materiale, conferendo ad una linearità elastica del materiale la possibilità di inserire un tratto plastico non lineare, dato da una certa curva o equazione. Per quel concerne i parametri elastici della card di suddetto materiale sono stati inseriti i dati in Tabella 5.2. Per quel che riguarda il tratto elastoplastico è stato creato un «field» in cui è stata data la curva di carico del tratto plastico della lega, in modo da predire il comportamento del materiale post-snervamento.

Caratterisitche elastiche della lega AlSi10		
E [Mpa]	ν	ρ [Kg/mm ³]
71000	0.3	2.7e-6

Tabella 5.2 – Caratteristiche elastiche della lega di Alluminio AlSi10

Il grafico di Figura 5.14, mostra la curva di carico, del tratto plastico, implementata nel software:

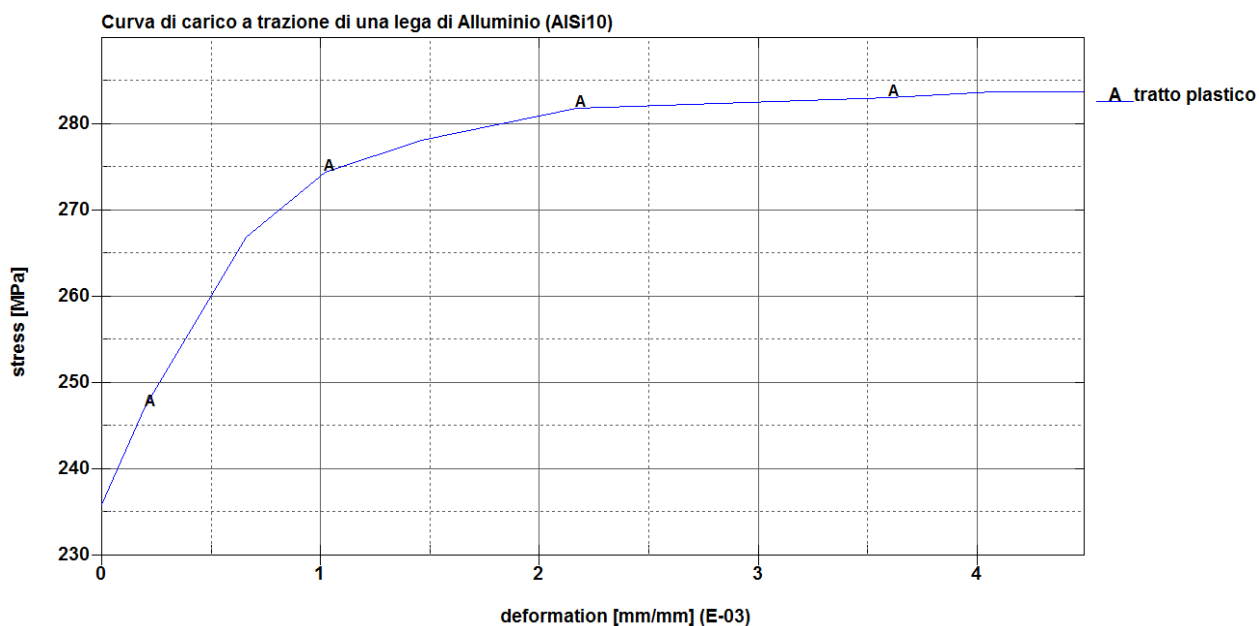


Figura 5.14 – tratto plastico di una curva di carico a trazione di una lega di Alluminio (AlSi10)

5.7.4 Condizioni al contorno

Per condizioni al contorno si intende, il movimento che la traversa compie nel comprimere il provino, ed il fissaggio del piatto su cui la schiuma viene schiacciata.

La non labilità del sistema verrà poi garantita con le condizioni di contatto. Per assegnare lo spostamento alla traversa sono stati eseguiti i seguenti passaggi:

- E' stato creato un "field", ossia una funzione dello spostamento in funzione del tempo. Sapendo che la velocità della traversa durante la prova di compressione è pari a 0,067 mm/sec e si mantiene costante per tutta la prova, la rampa implementata nel software è una funzione di tipo lineare.
- Successivamente è stato assegnato un "displacement" di 30mm, negativo lungo z, dove l'asse z coincide con l'asse del provino cilindrico, a cui è stata assegnata la funzione di spostamento precedentemente implementata.



Per quanto concerne il piatto a questo è stato imposto un spostamento pari a 0.

5.7.5 Creazione degli algoritmi di contatto

Per quanto riguarda i contatti sono stati scelte principalmente due tipologie:

- *Surface to Surface* per quanto riguarda il contatto tra la traversa e provino e tra piatto e provino. Questo contatto è un contatto di tipo “touch” a cui è stato assegnato un coefficiente di attrito generato dall’interfaccia metallo-metallo pari a 0,3.
- *Self-contact* ossia un “autocontatto” è stato assegnato a tutti gli elementi del provino in modo da apprezzare la fase di densificazione.

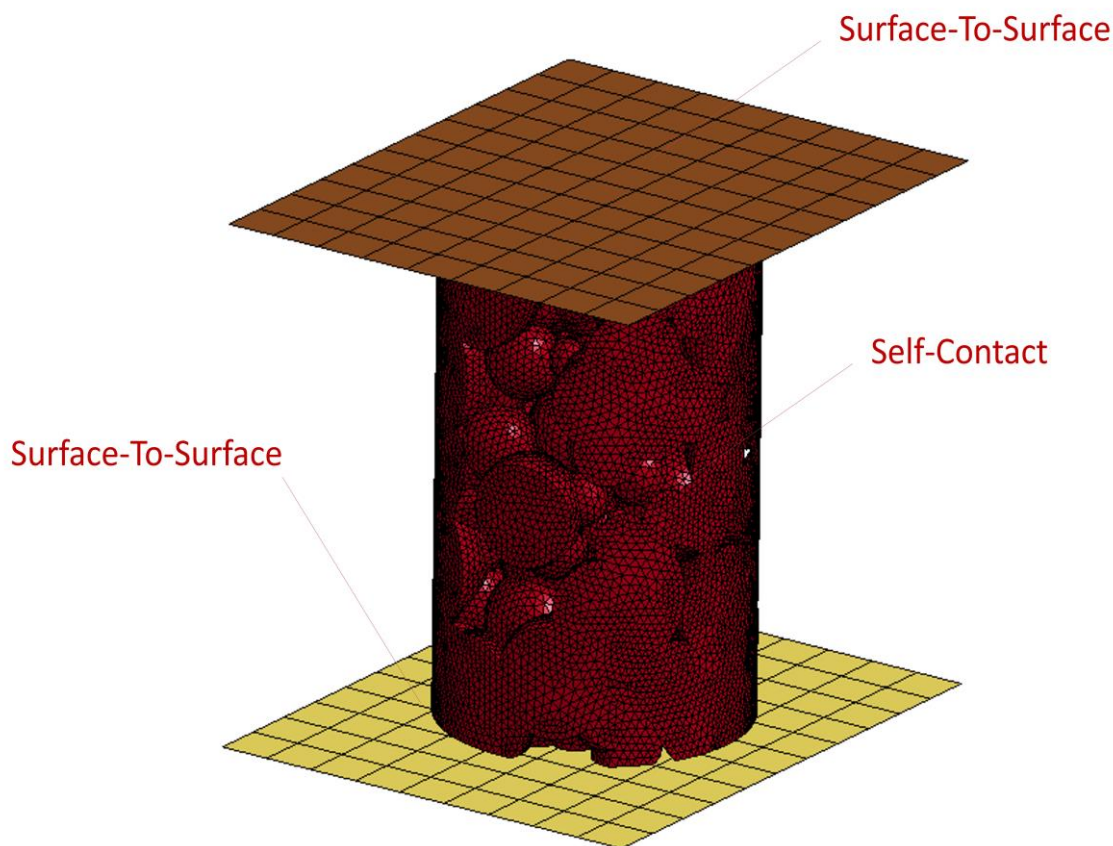


Figura 5.15 - Schema dei contatti utilizzati

Nella Figura 5.15, viene mostrato un schema riassuntivo dei contatti utilizzati. Una volta settata l'analisi il modello è stato risolto. Dato l'elevato numero di elementi presenti nel modello, i tempi di calcolo sono risultati essere molto lunghi. Per le 5 simulazioni eseguite il tempo di calcolo è stato mediamente di circa 16 ore.



Capitolo 6 Analisi dei risultati e confronto numerico-sperimentale

6.1 Analisi dei risultati e fase di postprocessing

Il modello FE, descritto nel capitolo precedente, è stato risolto con il codice di calcolo Ls-Dyna ed è stato post-processato mediante il software Ls-Prepost. Nella Figura 6.1 viene mostrato lo stato tensionale equivalente calcolato secondo il criterio di Von Mises al primo incremento. Come è possibile notare dall'immagine, il provino comincia a plasticizzarsi in alcune zone, ossia dove il valore di sollecitazione equivalente massima raggiunge i 284 MPa.

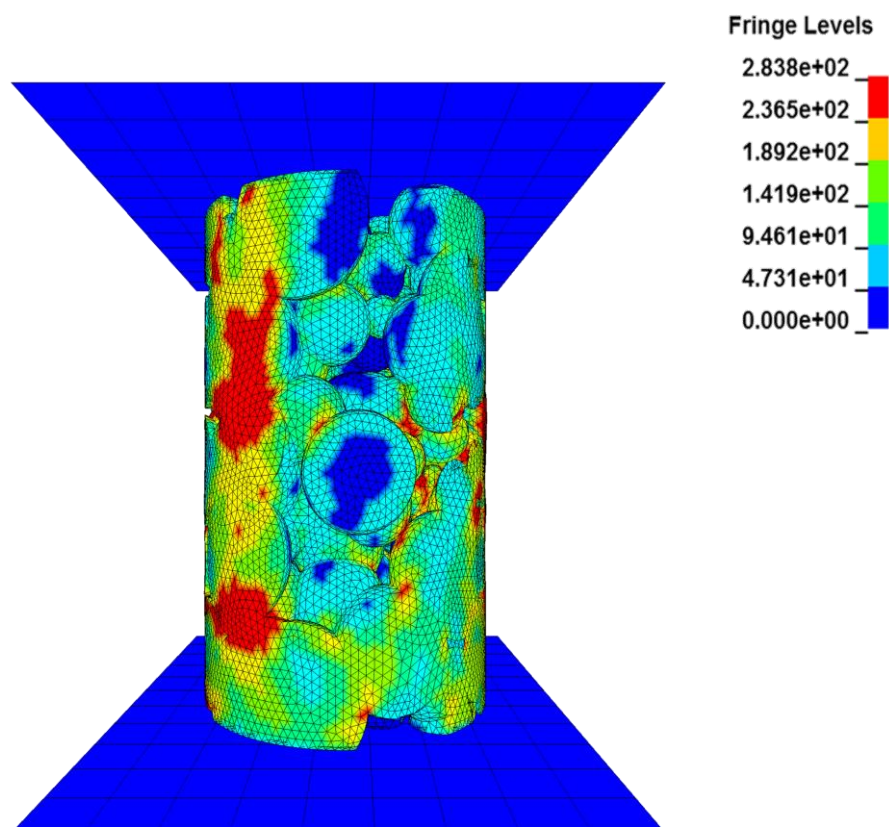


Figura 6.1 - Stato tensionale equivalente calcolato secondo il Criterio di Von Miseses al primo incremento.

Inoltre dalla figura 6.1 è possibile notare come sia assolutamente casuale la distribuzione delle tensioni, fenomeno giustificato dalla morfologia del provino. La siffatta distribuzione tensionale conferma, in prima istanza, la veridicità del modello FE. Nella figura seguente viene mostrato lo stato tensionale equivalente, calcolato secondo il criterio di Von Mises, all'ultimo incremento. Ancora una volta si denota una distribuzione delle tensioni completamente casuale e si evidenziano le zone completamente plasticizzate del provino durante la prova.

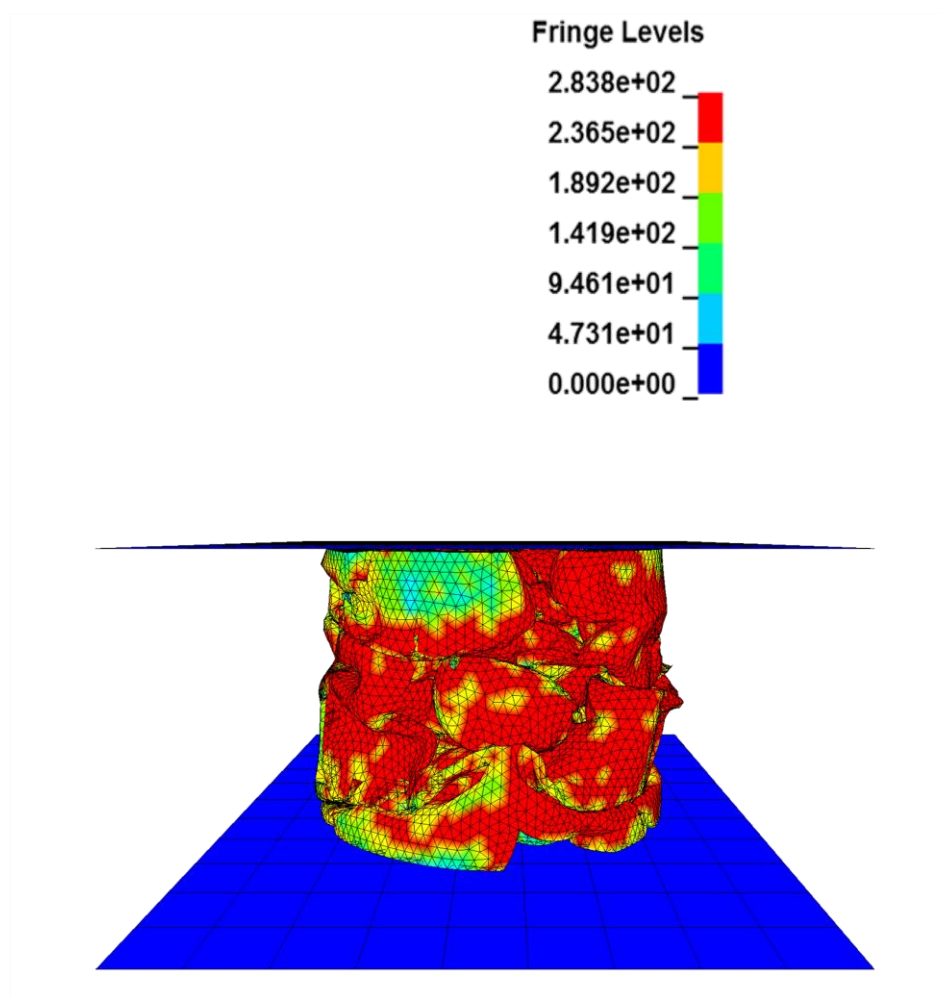


Figura 6.2 - Stato tensionale equivalente calcolato secondo il Criterio di Von Mises all'ultimo incremento.

Nella Figura 6.3 viene mostrato lo stato tensionale equivalente del modello, sia in vista frontale prospettica che sezionato, calcolato secondo l'ipotesi di Von Mises durante i principali step dell'analisi.

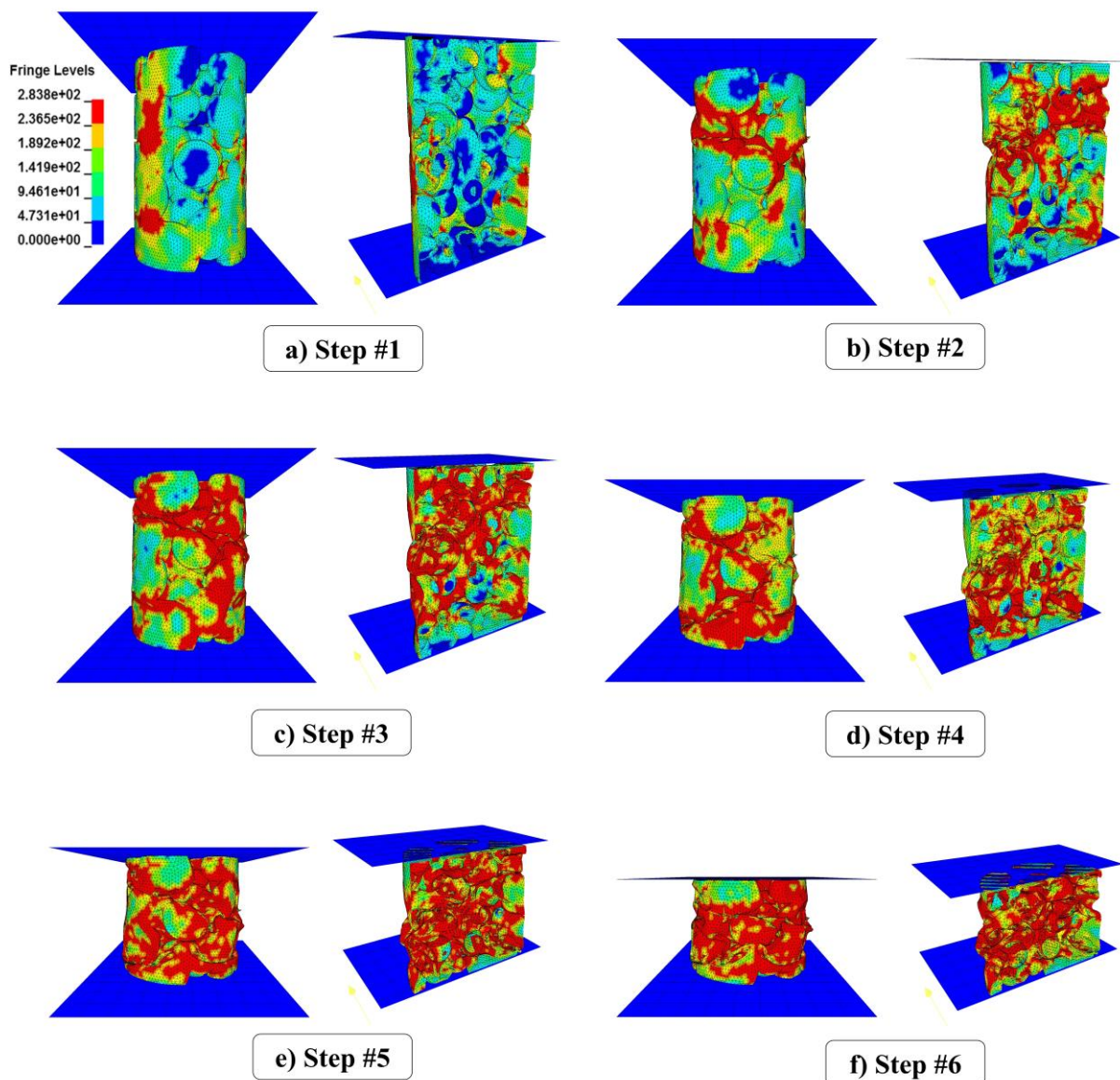


Figura 6.3 - Stato tensionale equivalente calcolato secondo il criterio di Von Mises. (a) 54 sec; (b) 117 sec; (c) 180 sec; (d) 243 sec; (e) 306 sec; (f) 450 sec.

Nella figura 6.3 si denota che il valore nominale di sollecitazione raggiunge valori sempre più alti durante l'avanzamento della traversa. Data la geometria del provino, che riproduce in modo micromeccanico la distribuzione di vuoti all'interno della schiuma, è possibile apprezzare in modo evidente la

distribuzione stocastica degli sforzi durante l'avanzamento della traversa mobile. Ovviamente, nonostante il valore numerico, risulta prossimo a quello reale, come risulta da una conferma sperimentale (in seguito), la posizione nello spazio sicuramente non sarà la stessa a causa di una variabilità del modello generato dal software digimat.

Come chiarito nei precedenti capitoli sono stati costruiti 5 modelli FE per una singola percentuale volumetrica di aria ($V_f=0.77$). In tal senso sono quindi state eseguite 5 simulazioni numeriche dei 5 modelli generati stocasticamente su Digimat. Nel grafico di Figura 6.4, viene mostrato il confronto tra le curve stress-strain delle 5 simulazioni eseguite e la curva ricavata sperimentalmente. È chiaro che le curve ricavate dalle simulazioni numeriche non coincidono con quelle trovate per via sperimentale, tuttavia mostrano comunque un andamento classico delle schiume sottoposte a compressione. Infatti dopo un primo tratto elastico, seguito dalla plasticizzazione del materiale vi è un collasso della tensione dovuto ad un fenomeno di instabilità locale. Successivamente comincia la fase a tensione pressoché costante, ossia il *plateau*, seguito da una fase di densificazione, opportunamente garantita dal self-contact assegnato in fase di preprocessing. Il presente modello numerico ha quindi un comportamento a compressione analogo a quello dei provini reali.

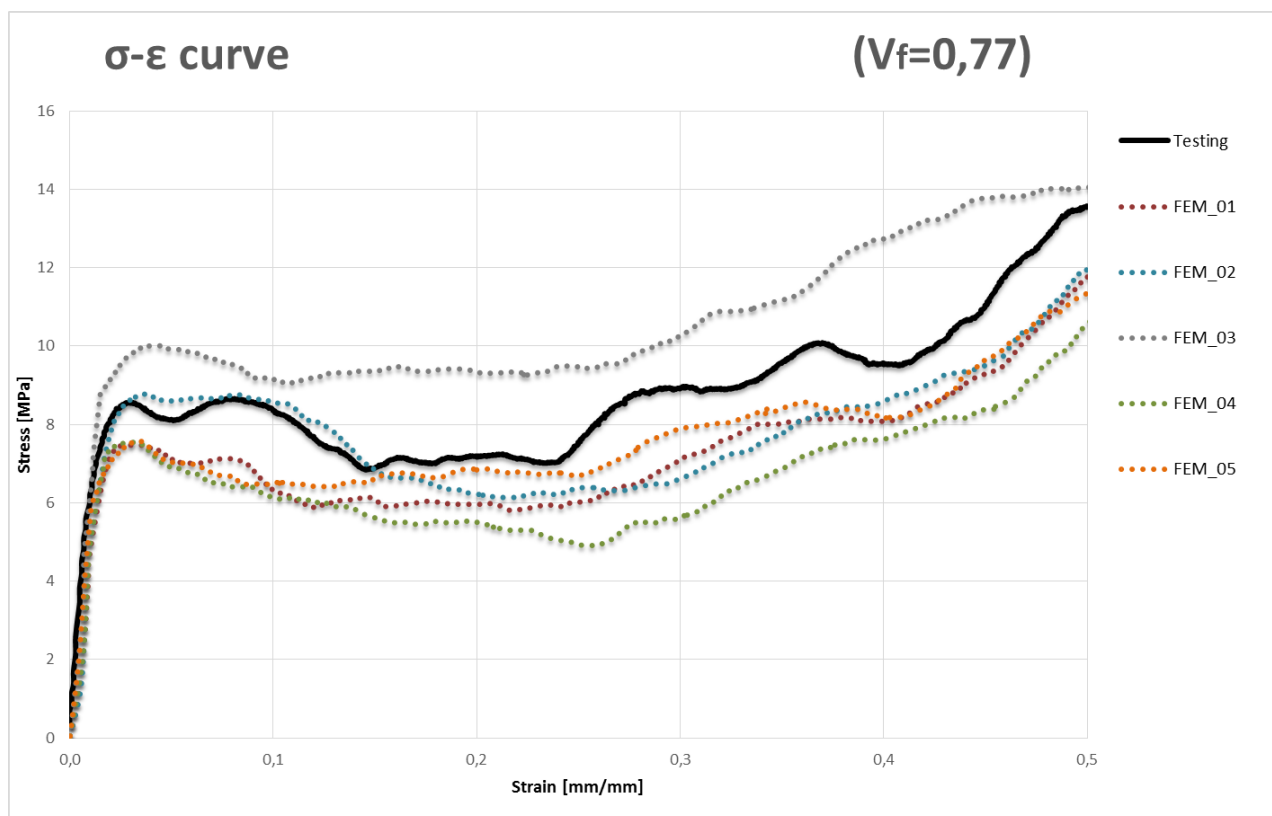


Figura 6.4 - Confronto numerico sperimentale ($V_f = 0,77$)

Nella figura seguente vengono mostrati i parametri caratteristici delle curve di carico a compressione per una schiuma di Alluminio, ossia E (Modulo di Young), σ_y (tensione di snervamento), σ_{pl} (ossia la tensione di plateau) e σ_{max} (tensione massima registrata durante la prova).

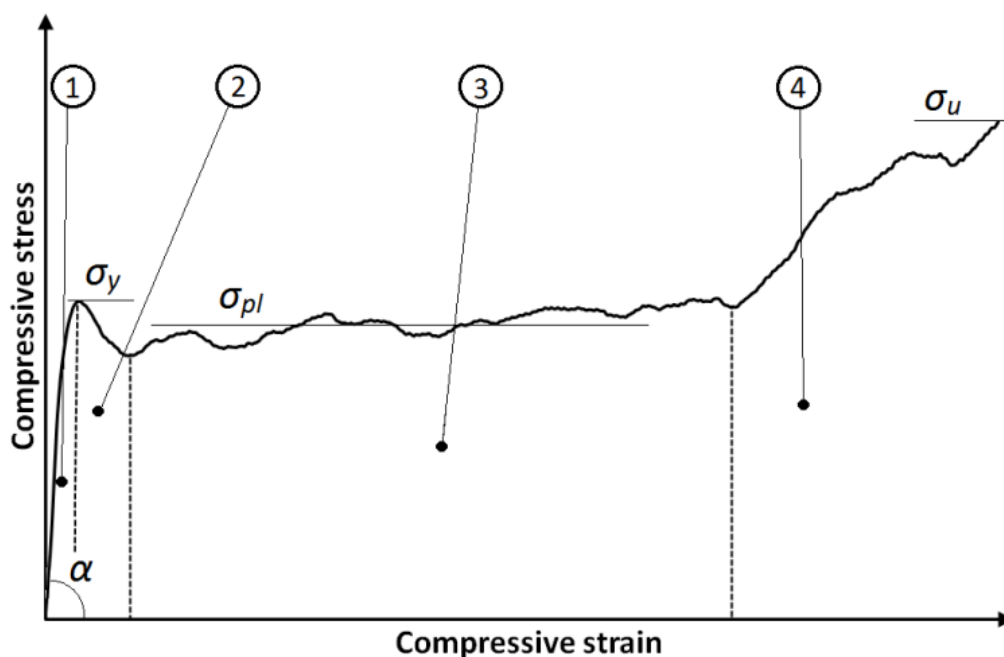


Figura 6.5 - Grandezze caratteristiche di una curva stress-strain per una schiuma di alluminio

In tale figura sono anche evidenziate le zone caratteristiche del diagramma (1-zona elastica, 2-plasticizzazione locale, 3-plateau stress, 4-zona di densificazione). Al fine di validare il modello numerico, sulla base dei risultati sperimentali descritti nel capitolo 4, è stato effettuato un confronto dei dati empirici con quelli generati dall'analisi FEM. In particolare sono stati calcolati, dalle cinque curve ottenute numericamente, il valor medio e la varianza di ogni grandezza fondamentale. I valori medi di tali grandezze sono stati quindi confrontati con quelli ricavati sperimentalmente, in modo da calcolare lo scostamento percentuale.

	E [MPa]	σ_y [MPa]	σ_{pl} [MPa]	σ_u [MPa]
FEM	637.20 (21.29)	8.21 (1.00)	6.93 (1.30)	11.89 (1.16)
Experimental	653.15 (23.42)	8.52 (1.42)	7.23 (1.71)	12.55 (1.75)
$\% \Delta_{exp/FEM}$	2.44	3.64	4.15	5.26

Tabella 6.1 - confronto dati numerici e quelli sperimentali ($V_f=0,77$)

Nella tabella sopra viene mostrato infatti lo scostamento percentuale per ogni parametro preso in considerazione. Nelle parentesi è espressa la varianza.

Dai dati mostrati in tabella si evince una spinta correlazione tra i valori numerici e quelli sperimentali. Il valore del modulo di Young registra infatti uno scostamento percentuale molto esiguo. Il motivo è dovuto al fatto che si sta analizzando un parametro della curva relativo al tratto elastico, in cui le instabilità del comportamento geometrico e del materiale risultano meno marcate. Fatta eccezione per il modulo di Young che presenta uno scostamento percentuale al di sotto del 2.5%, negli altri casi lo scostamento percentuale è superiore al 3 % e in alcuni casi superiore al 5%. A valle della zona di plateau lo scostamento percentuale è caratterizzato da un valore sicuramente più pronunciato a causa delle marcate instabilità che si palesano in tale fase.

Si può concludere dicendo che tale modello risulta pronto per analizzare il comportamento di una schiuma metallica di alluminio, in fase elastica. Il modello mostra un comportamento molto simile a quello della schiuma reale, il che lascia trasparire un miglioramento del modello al fine di raggiungere risultati più soddisfacenti anche in campo plastico. Mediante questo lavoro di dottorato è stata inoltre studiata ed analizzata la possibilità di eseguire delle analisi FE, mediante l'utilizzo di DIGIMAT, il quale è un software che nasce per simulare il comportamento micromeccanico di compositi a fibra corta. Dai risultati ricavati e da un'adeguata taratura del modello numerico, con i risultati sperimentali, si evince la possibilità di effettuare anche analisi differenti dai materiali compositi.

Infine si potrebbe nel seguito, al fine di diminuire lo scarto numerico sperimentale del modello FE, implementare varianti nella creazione del modello geometrico: studiare la variabilità dei risultati in funzione dell'*aspect ratio* dei



void presenti nel provino, diminuire l'onere computazionale generando un modello FE più snello.



Capitolo 7 Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di ricerca si è posto come obiettivo quello di generare un modello geometrico mediante l'utilizzo del software DIGIMAT, di una schiuma di Alluminio a cella chiusa, al fine di caratterizzare la micromeccanica del provino mediante un'analisi FEM.

E' stato condotto uno studio morfologico di una schiuma di Alluminio, avente differenti frazioni volumetriche di aria (0,77 – 0,81 – 0,86 – 0,88), prodotta in laboratorio con un precursore gentilmente fornito dalla Alulight. Il precursore, costituito da una lega di Alluminio (AlSi10) con lo 0.8% in peso di TiH_2 (agente schiumante), è stato ottenuto mediante tecnica PCM (Powder Compact Melting). È stato effettuato uno studio di ottimizzazione del processo di produzione al fine di creare dei provini esenti da difetti interni e superficiali. Una volta realizzati i campioni, al fine di generare un modello geometrico, valido per le analisi FEM, è stato necessario studiare i parametri caratteristici di una singola cella. Da tale studio sono stati inseriti, come valori discriminanti nel software DIGIMAT, le seguenti variabili: densità relativa - ρ^* , diametro massimo delle porosità - d_{max} , frazione volumetrica di aria (V_f). E' stata valutata la possibilità di generare, mediante i software utilizzati, delle inclusioni per realizzare un modello membranale delle porosità presenti all'interno del

provino. Per le operazioni di modifica e completamento del modello geometrico è stata valutata la possibilità di utilizzare il software parametrico-variazionale CATIA V5 R23. Dal modello CAD, è stato quindi realizzato un modello FE, mediante il software Ls-Prepost, capace di predire il comportamento a compressione di una prova quasi-statica (velocità di avanzamento pari a 0.067 mm/s). Poiché il processo di creazione della geometria risulta fortemente dipendente dalla metodologia random del software DIGIMAT, è risultato necessario creare differenti modelli CAD aventi la stessa percentuale volumetrica. I modelli FE sono stati processati con la soluzione esplicita non lineare (SOL700) di LS-Dyna. Al fine di validare il modello numerico, è stato quindi effettuato un confronto statistico, numerico-sperimentale dei risultati ottenuti. In particolare è stata analizzata la curva di carico (σ - ϵ) con le relative grandezze tensili discriminanti. Il risultato è ultramodo positivo per l'analisi del fenomeno in campo elastico.

Le attività future saranno orientate nella valutazione del modello con le altre frazioni volumetriche anche considerando la possibilità di utilizzo di diversi solutori per ridurre i tempi di calcolo, e macchine più potenti, quali ad esempio dei cluster, che permettano di condurre una campagna FEM.

Infine si potrebbe nel seguito, al fine di diminuire lo scarto numerico sperimentale del modello FE, implementare varianti nella creazione del modello geometrico: studiare la variabilità dei risultati in funzione dell'aspect ratio dei void presenti nel provino, diminuire l'onere computazionale generando un modello FE più snello.

Un ulteriore sviluppo consiste nel creare un modello FE, sempre di tipo mebbbranale equivalente, ma con una distribuzione deterministica di spessore dei singoli elementi. Questo risulta necessario poiché, nel modello reale, lo spessore delle pareti di ogni singola cavità è diverso in ogni area. Ciò



comporterebbe, in fase di analisi FEM, una variazione rispetto al modello attuale dovuta proprio alla variazione di rigidità che si genererebbe da spessori diversi.

L'intera attività di ricerca è inserita in un macro filone relativo all'utilizzo dei materiali compositi sandwich nel settore dei trasporti. In tal senso, la schiuma metallica si presta ad essere usata come riempitivo di un materiale composito sandwich. I compositi a base di schiuma d'alluminio sono materiali molto interessanti per l'applicazione nel settore dei trasporti. In particolare, i sandwich realizzati tramite legame metallurgico con due pelli in alluminio e il core in schiuma d'alluminio (AFS), si candidano all'impiego in componenti strutturali grazie alla loro resistenza a fuoco, alla elevata riciclabilità associate ad un rapporto resistenza-peso ed a proprietà di assorbimento di energia estremamente elevate.



Bibliografia e Sitografia

- [1] Gibson, L. J., and M. F. Ashby. *"Cellular Solids: Structure and Properties"*. 2nd ed. Cambridge University Press, 1997.
- [2] Banhart J., 2001, *"Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams"* Progress in Materials Science, 46, 559–632.
- [3] Gibson L.J., Ashby M. F., 1988, *"Cellular Solids Structure & Properties"*, Pergamon Press.
- [4] Gibson L.J., Ashby M. F, Harley B. A., 2010, *"Cellular materials in nature and medicine"*, Cambridge University Press.
- [5] Iannace S., Verdolotti L., Colini S., *"La storia dei materiali cellulari nell'ingegneria"*.
- [6] Sosnik B., *US Patent 2434775*, 1948.
- [7] Curran D. C., 2003, *"Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent"*, Ph.D. Thesis Department of Materials Science and Metallurgy - University of Cambridge.
- [8] Elliot J. C., *US Patent 2751289*, 1956.
- [9] Allen B. C., *US Patent 3087807*, 1963.
- [10] Akiyama S. et al., *European Patent 0210803*, 1986.
- [11] Iljoon J. et al., *US Patent 5115697*, 1992.
- [12] *"Multidisciplinary Research Initiative on Ultralight Metal Structures"*, 1996.
- [13] *"Zellulare metallische Werksoffe"*, DFG-Priority Program 1075, Bonn 1999.



- [14] "TILAS - *Tecnologie Innovative di Lavorazione delle Schiume Metalliche*", PRIN, Milano 2006.
- [15] Cymat, www.cymat.com
- [16] Alulight, www.alulight.com
- [17] Shinko Wire Company Ltd, <http://www.shinko-wire.co.jp>
- [18] Ashby M. F., Evans A. G., Fleck N. A., Gibson L. J., Hutchinson J. W., Wadley H.N.G., 2000, "*Metal Foam: a Design Guide*", Butterworth-Heinemann.
- [19] Degischer H. P., Kriszt B., 2002, "*Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*", Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- [20] Banhart J., Weaire D., 2002, "*On the road again: Metal Foams find favor*", Physics Today.
- [21] Banhart J., 2005, "*Metal Foams: the mystery of stabilization*", Proceedings MetFoam 2005 World Congress, Kyoto.
- [22] Ridgway J.J., "*Cellularized Metal and Method of Producing Same*", US Patent 3,297,431, 1967.
- [23] Kotera S., "*A New or Improved Electrode or Pole for use in Electric Cells*", UK Patent 206797, 1923.
- [24] Wang N., Starke E.A., Wadley H.N.G., 1998, "*Porous Al Alloys by Local Melting and Diffusion of Metal Powders. in Porous and Cellular Materials for Structural Applications*" San Francisco, California, U.S.A.: Materials Research Society.
- [25] Jin I., Kenny L.D., San H., "*Method of Producing Lightweight Foamed Metal*", U.S. Patent 4,973,358, 1990
- [26] Jin I., Kenny L.D., Sang H., "*Stabilized Metal Foam Body*", US Patent 5,112,697, 1992.
- [27] Sang H., Kenny L.D., Jin O., "*Process for Producing Shaped Slabs of Particle Stabilized Foamed Meta*", U.S. Patent 5,334,236, 1994.
- [28] Simone A.E., Gibson L.J., 1998, "*Aluminum Foams Produced by Liquid- State Processes*", Acta Mater., 46: p. 3109-3123.
- [29] Niebylski L.M., Jarema C.P., Lee T.E., "*Reinforced Foamed Metal*", U.S. Patent 3,940,262, 1976.



- [30] Akiyama S., Ueno, H., Imagawa, K., Kitahara, A., Nagata, S., Morimoto, K., Nishikawa, T. and Itoh, M., US Patent 4,713,277: *Foamed Metal and Method of Producing Same*.1987.
- [31] Aoyagi N., Kojima Y., 1998, "Production Process and Microstructure of Aluminium Alloy Foams by Semi-Solid Stirring Method", in "5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites", Colorado, USA.
- [32] ALPORAS, "ALPORAS™ brochure", 1998, Shinko Wire Co., Ltd., Amagasaki-shi, Japan.
- [33] Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A., 2000, "ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties, and Applications", *Advanced Engineering Materials*, 2(4): p. 179-183.
- [34] Miyoshi T., Hara S., Mukai T., Higashi K., 2001, "Development of a Closed Cell Aluminium Alloy Foam with Enhancement of the Compressive Strength", *Materials Transactions, JIM*, 42(10): p. 2118-2123.
- [35] Simancik F., Kovacik J., 1997, "Porosity in Complex 3D-Parts Prepared from Aluminium Foam". In "Metal Foams", Bremen, Germany: MIT-Verlag Publishing, Bremen.
- [36] Schorghuber F., Simancik F., Hartl E., "Method of Producing Molded Bodies of a Metal Foam", in *US Patent 5,865,237*. 1999
- [37] Gergely V., Clyne T.W., 2000, "The FORMGRIP Process: Foaming of Reinforced Metals by Gas Release in Precursors", *Adv. Engng. Mater.*, 2: p. 175-178.
- [38] Gergely V., 2000, "Melt Route Processing for Production of Metallic Foams, in *Materials Science and Metallurgy*", University of Cambridge: Cambridge.
- [39] Gergely V., Clyne T.W., 1998, "The Effect of Oxide Layers on Gasgenerating Hydride Particles During Production of Aluminium Foams", in "Porous and Cellular Materials for Structural Applications", San Francisco: MRS.
- [40] Gergely V., Clyne T.W., 1999, "A Novel Melt-Based Route to Aluminium Foam Production", in *International Conference on Metal Foams and Porous Metal Structures (MetFoam '99)*, Bremen, Germany: Verlag MIT.
- [41] Matijašević B., 2006, "Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making Improved Metal Foams", Ph.D. Thesis.



[42] Digimat Example Manual, Ex-stream Engineering, 2013.

[43] Ls-Dyna User manual;